



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV AUTOMATIZACE A INFORMATIKY

INSTITUTE OF AUTOMATION AND COMPUTER SCIENCE

ELEKTRONICKÁ LADIČKA NA UKULELE

ELECTRONIC UKULELE TUNER

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Václav Staněk

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Tomáš Marada, Ph.D.

BRNO 2017

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav automatizace a informatiky
Student: **Václav Staněk**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Tomáš Marada, Ph.D.**
Akademický rok: 2016/17

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Elektronická ladička na ukulele

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Cílem bakalářské práce je návrh a realizace elektronické ladičky na ukulele. Realizace bude provedena s použitím platformy Arduino. Ladička bude snímat zvuk nástroje a provádět jeho analýzu. Zda je struna naladěná správně nebo rozladěná bude zobrazeno na displeji. Nastavení tenze struny bude řešeno pomocí krokového motoru.

Cíle bakalářské práce:

1. Seznamte se s funkcí elektronických ladiček.
2. Seznamte se s elektronickou platformou Arduino, HW a jejím programováním.
3. Proveďte návrh a realizaci elektronické ladičky.
4. Proveďte zhodnocení dosažených výsledků.

Seznam doporučené literatury:

VODA, Zbyšek. Průvodce světem Arduina. Bučovice: Martin Stříž, 2015. ISBN 978-80-87106-90-7.

Instructables - DIY How To Make Instructions [online]. Copyright © 2016 Autodesk, Inc. [cit. 01.12.2016]. Dostupné z: <http://www.instructables.com/id/Arduino-Guitar-Tuner/>

Instructables - DIY How To Make Instructions [online]. Copyright © 2016 Autodesk, Inc. [cit. 01.12.2016]. Dostupné z: <http://www.instructables.com/id/Automatic-Guitar-Tuner/>

Automatic guitar tuner - YouTube. YouTube [online]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=qFm7QDSQOHQ>

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2016/17

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Radomil Matoušek, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Tématem bakalářské práce je návrh a realizace elektronické ladičky pro ladění čtyřstrunného drnkacího hudebního nástroje zvaného ukulele. Ladička bude využívat krokový motor k ladění nástroje a její součástí bude také LCD displej, který poslouží k vizualizaci stavu naladění jednotlivých strun. Ladička bude řízena pomocí platformy Arduino. Práce je rozdělena do tří základních částí. Nejprve je zmapován aktuální sortiment ladiček a jejich funkce. Druhá část je zaměřena na výběr a návrh jednotlivých komponentů. Tento návrh je zrealizován a je ověřena jeho funkčnost. Realizace je popsána v závěrečné části práce.

ABSTRACT

The subject of the bachelor's thesis is a design and implementation of an electronic tuner for tuning a four-stringed fretted musical instrument called the ukulele. The tuner will be able to tune this instrument with a stepper motor. A part of it will be a LCD display which will serve for the visualisation of a tuning process of each string. The tuning system will be controlled with an Arduino microcontroller. This thesis is divided into three main parts. At first, the current range of electronic tuners and their functions will be assumed. The second part is aimed at selection and design of individual components for the electronic tuner. This design is implemented and its functionality is verified. The implementation is described in the final part of the thesis.

KLÍČOVÁ SLOVA

Ukulele, automatická ladička, snímání zvuku, vyhodnocení frekvence, Arduino, krokový motor, CNC shield

KEYWORDS

Ukulele, automatic tuner, sound sampling, frequency analysis, Arduino, stepper motor, CNC shield

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

STANĚK, V. *Elektronická ladička na ukulele*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2017. 50 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Tomáš Marada, Ph.D.

.

PODĚKOVÁNÍ

Tímto chci poděkovat vedoucímu mé bakalářské práce, Ing. Tomáši Maradovi, Ph.D., za odborné vedení.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing. Tomáše Marady, Ph.D. a s použitím literatury uvedené v seznamu literatury.

V Brně dne 25. 5. 2017

.....

Václav Staněk

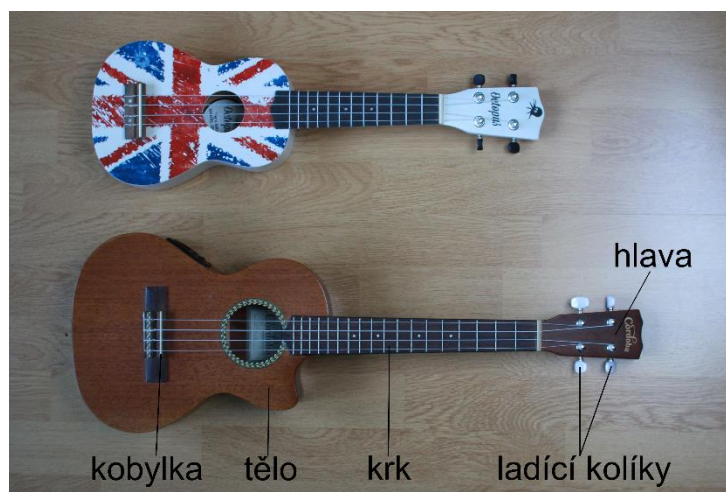
OBSAH

1	ÚVOD.....	15
2	ELEKTRONICKÉ LADIČKY.....	17
2.1	Základní ladičky	17
2.2	Automatické ladičky	17
3	NÁVRH ELEKTRONICKÉ LADIČKY	20
3.1	Snímání zvuku	20
3.1.1	Piezoměnič.....	20
3.1.2	Dynamický mikrofón.....	21
3.1.3	Snímače integrované v nástroji.....	21
3.2	Zpracování a analýza zvuku	22
3.2.1	Arduino	22
3.2.2	Úprava elektrického signálu	23
3.3	Vizualizace naladění	26
3.4	Ladění	26
3.4.1	Krokový motor	26
3.4.2	Řadič krokového motoru	28
3.4.3	CNC shield	29
3.4.4	Redukce pro spojení motoru a ladícího kolíku	29
4	REALIZACE ELEKTRONICKÉ LADIČKY	30
4.1	Sestavení elektronického obvodu	30
4.2	Snímač zvuku	31
4.3	Vyhodnocení stavu naladění struny Arduinem	31
4.3.1	Dosažení vhodné vzorkovací frekvence	31
4.3.2	Vyhodnocení frekvence vstupního signálu.....	33
4.3.3	Vyhodnocení stavu naladění.....	35
4.4	Výběr laděné struny a vizualizace naladění	35
4.4.1	Klávesnice	36
4.4.2	LCD displej.....	36
4.5	Výroba redukce pro spojení hřídele motoru a ladícího kolíku	38
4.6	Ladění krokovým motorem	38
4.7	Výsledná podoba ladičky.....	40
5	ZÁVĚR	44
6	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	47
7	SEZNAM OBRÁZKŮ, TABULEK A ZKRATEK.....	49
7.1	Seznam obrázků.....	49
7.2	Seznam tabulek.....	50
7.3	Seznam zkratk.....	50
8	SEZNAM PŘÍLOH.....	50

1 ÚVOD

Ukulele je drnkací nástroj se čtyřmi strunami, často popisovaný jako „malá kytara.“ Existují čtyři různé velikosti ukulele: Sopránové (nejmenší – délka cca 53 cm), koncertní, tenorové a barytonové (největší – délka cca 74 cm). Sopránové a tenorové ukulele je možné vidět na obr. 1 i s popisem základních částí nástroje.

Obvyklé ladění sopránového, koncertního a tenorového ukulele je (od horní po spodní strunu) G₄-C₄-E₄-A₄. Tato bakalářská práce se zaměřuje právě na toto nejčastější ladění. Existují také různá provedení nástroje: akustické (tón je tvořen vlastním tělem nástroje a šířen vzduchem), elektrické (vibrace kovových strun jsou snímány elektromagnetickým snímačem a jsou převáděny na elektrický signál, který jde přes zesilovač do reproduktorů [1]) a elektroakustické (akustické se snímačem zvuku zabudovaným v těle nástroje, který převádí zvuk na elektrický signál). Ukulele se těší stále větší oblibě zejména pro snadné základy hry na něj a jeho kompaktní rozměry.



Obr. 1: Sopránové akustické ukulele a tenorové elektroakustické ukulele se základním popisem

Mnoho hráčů na ukulele a kytaru využívá k ladění ladičky. Ať už z důvodu toho, že nemají dostatečný hudební sluch na to, aby nástroj naladili sami, či čistě z pohodlnosti. K ladění ukulele se dají použít ladičky běžně využívané při ladění kytar. U neautomatických ladiček je vždy potřeba, aby hráč drknul na strunu, kterou ladí a její tón porovnal se správným tónem ladičky. Nebo to za něj porovná elektronická ladička a zobrazí výsledek. Na základě porovnání je provedena změna tenze struny ladícím kolíkem a tento postup se opakuje až do úplného naladění nástroje.

Ladiček je několik druhů. Rezonanční ladička má tvar vidlice a její tón odpovídá komornímu A (tón A₄), takže k naladění je také potřeba hudebního sluchu k odstupňování tónů. Foukací ladička má čtyři píšťalky, každá odpovídá jednomu tónu ukulele. U tohoto druhu je potřeba posoudit tón zahráný na píšťalku a tón struny. Pro rezonanční a foukací ladičku je potřeba klid, aby byly dobře slyšet tóny. To je ale problematické od táboráku až po koncert na letním festivalu. Hluk v okolí při ladění eliminují elektronické ladičky,

které po zahrání struny využívají signálu, vycházejícího z nástroje, a vizualizují stav naladění. Tudíž není potřeba k ladění lidského sluchu.

Pro ještě větší usnadnění ladění se v posledních letech rozběhl vývoj automatických ladiček na kytaru, které kytaru naladí zcela samy, muzikant musí jen brknout na struny. Většina těchto ladiček je integrovaná přímo na nástroji, což limituje jejich použití pouze na jednu jedinou kytaru. Na trhu se vyskytuje také ladička použitelná jak pro kytaru, tak pro ukulele a další drnkací nástroje. Je založena na otáčení ladícího kolíku motorem, který hráč ke kolíku přiloží.

Cílem této práce je navrhnout a sestavit automatickou ladičku na ukulele s použitím platformy Arduino, která bude univerzálně použitelná pro všechna obvykle laděná ukulele. Uživatel si zvolí, kterou strunu bude ladit. Otáčení ladícím kolíkem bude zajištěno krokovým motorem. Ladička bude také vizualizovat stav naladění. Napájení ladičky bude zajištěno bateriemi.

Práce pojednává o současném sortimentu elektronických ladiček a jejich funkcích. Dále je zaměřena na návrh a realizaci univerzální automatické ladičky na ukulele. Zabývá se možnostmi snímání zvuku z nástroje, jeho zpracování, následnou vizualizací výsledků a ladění pomocí krokového motoru. Pro ověření funkčnosti ladičky je využito tenorové elektroakustické ukulele.

2 ELEKTRONICKÉ LADIČKY

Elektronické ladičky usnadňují ladění hudebních nástrojů. Pro účely této práce jsou zajímavé ladičky na ukulele a kytary, protože snímání zvuku i ladění funguje u obou nástrojů na stejném principu. Elektronické ladičky zpracovávají zvuk z hudebního nástroje, vyhodnocují jeho frekvenci a podle ní určují, zda je struna naladěna či nikoliv. Stav naladění se zobrazuje na displeji nebo pomocí LED diod. Existují dva základní typy elektronických ladiček využívaných pro ladění kytary a ukulele: tzv. klasické ladičky a klipsové ladičky. Specifickou skupinou jsou pak ladičky automatické.

2.1 Základní ladičky

Klasické ladičky mají kromě ladicí funkce navíc většinou integrovaný metronom a generátor tónů. Zvukový vstup je zajištěn obvykle 6,3 mm jackem, do něž se připojuje mikrofon nebo snímače elektrického či elektroakustického nástroje. Další možností zachycení zvuku je přes integrovaný mikrofon, který však může být ovlivněn ruchy z okolí. Tyto ladičky většinou disponují velkým přehledným displejem v kombinaci s LED diodami, jak je vidět na obr. 2.

Velice oblíbené jsou pak klipsové neboli klipové ladičky, které se připnou pomocí klipsu na hlavu nástroje a snímají jeho vibrace pomocí zabudovaného piezoměniče. Ten je vidět na obr. 3. Piezoměnič funguje jakožto kontaktní mikrofon a vytváří elektrický signál, který ladička zpracovává a stav naladění zobrazuje na malém displeji. Klipové ladičky jsou menší a obvykle také levnější než klasické ladičky. Navíc díky tomu, že snímají vibrace místo zvuku, dokonale eliminují okolní ruch.



Obr. 2: Klasická ladička, převzato z: <https://kytary.cz>

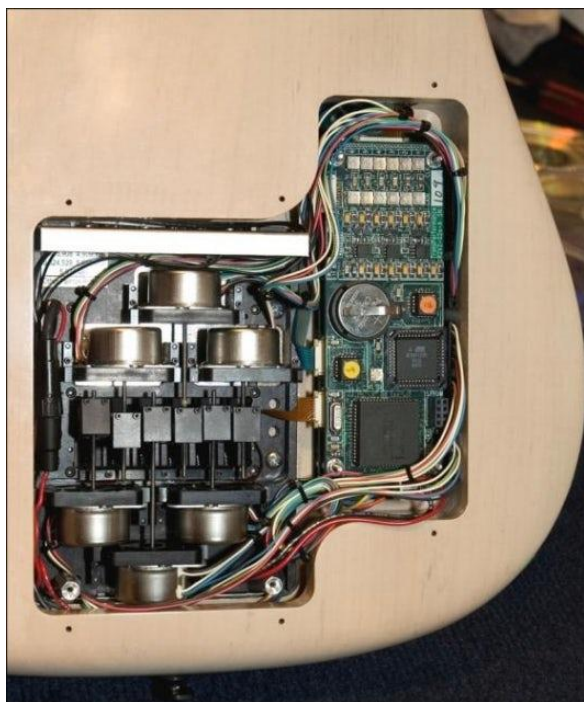


Obr. 3: Klipová ladička a klipová ladička bez zadního krytu s piezoměničem

2.2 Automatické ladičky

Automatickým laděním drnkacích nástrojů se začala zabývat firma TransPerformance. Již v roce 1991 používal rockový kytarista Jimmy Page jejich samostatně ladící systém

ve své elektrické kytáře [2]. Stačilo jen brknout na všechny struny a kytara se naladila. V té době byl ladící systém velice nákladný. S novou, levnější technologií přišel TransPerformance v roce 2005. S ladícím systémem TransPerformance bylo zamezeno ladícím kolíkům otáčení a struny byly napínány u kobylky, což vyžadovalo velké zásahy do těla nástroje (obr. 4) a systém bylo možné namontovat pouze do elektrických kytar. Kromě ladícího mechanismu a počítače byl do těla namontován také ovládací panel a LCD displej, jak je vidět na obr. 5. [3, 4]



Obr. 4: Ladící mechanika a počítač
TransPerformance, převzato z [3]



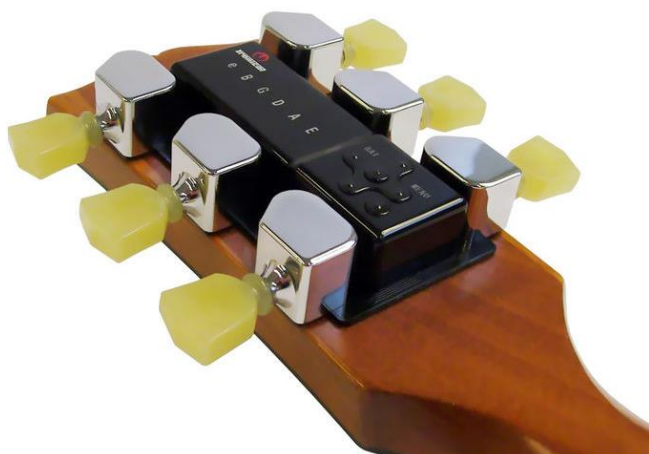
Obr. 5: Tělo kytary se systémem
TransPerformance, převzato z [3]

V roce 2007 firma Gibson představila veřejnosti elektrickou kytaru s názvem „The Robot Guitar,“ která se uměla sama naladit. Gibson používal ladící systém od německé firmy Tronical. Zvuk byl snímán pomocí piezo snímačů a vyhodnocován mikroprocesorem. Ke každému ladícímu kolíku náležel jeden motorek a nastavení ladičky se provádělo na těle kytary pomocí otočného knoflíku. Tato automatická ladička byla zabudována v těle, krku a hlavě nástroje a stejně jako systém TransPerformance se nedala použít u jiné kytary. Firma Gibson vydala limitované edice svých 6 modelů s automatickým laděním. [5]

O další vývoj v oblasti automatického ladění se znovu zasloužila firma Tronical, jejíž novou ladičku poprvé předvedl v roce 2013 Gibson na svých kytarách jako „MinETune™“ [6]. Nová ladička byla daleko kompaktnější, celý mikroprocesor se senzory i s baterií se vešel mezi dvě řady ladících kolíků, z nichž každý měl vlastní ladící motorek, což je vidět na obr. 6. Technologie byla levnější, ale problém s nemožností použití u jiné kytary přetrvával. Gibson navíc nenabízel jedinou akustickou kytaru s automatickou ladičkou. Tento problém však vyřešila firma Tronical, která začala

prodávat svoji ladičku používanou na kytarách Gibson pod názvem „Tronical Tune.“ Tuto ladičku je možné namontovat téměř na jakoukoliv kytaru včetně akustických nástrojů. Prodává se v konfiguracích pro různé rozteče a rozmístění děr ladících kolíků. Montáž je snadná a zvládne ji každý muzikant sám. Zásah do těla nástroje je minimální, pouze se vymění ladící kolíky a naistaluje se k nim ladící mikroprocesor s ovládacím panelem a indikátory naladění, jak je vidět na obr. 6 [7]. Ladičku lze sice použít téměř pro jakoukoliv kytaru, nicméně je poté vázána na jeden konkrétní nástroj, což je ale vyváжено kompaktností a rychlostí ladění. Aktuální cena Tronical Tune se pohybuje kolem 5000 Kč [8].

Převratnou automatickou ladičkou je „Roadie Tuner“, určený primárně pro kytary, ale použitelný také pro ukulele a podobné nástroje. Jedná se o zařízení (viz obr. 7), které se spáruje přes bluetooth s chytrým telefonem. V aplikaci k tomu určené uživatel zvolí laděný nástroj a způsob, kterým jej chce naladit. Ladička se přiloží k ladícímu kolíku. Mobilní telefon snímá zvuk nástroje pomocí interního mikrofону a přes bluetooth posílá informace o naladění do ladícího zařízení, které pomocí motorku otočí ladící kolík. Zařízení je poměrně kompaktní, ale nevýhodou je nemožnost použití v hlučných prostředích, kde je mobilním telefonem přijímaný zvuk znehodnocován okolními ruchy. Limitující je také nutnost použití mobilního telefonu, bez nějž ladička nefunguje. Velkou výhodou je použitelnost pro různé nástroje. Cena je cca 2500 Kč. [9]



Obr. 6: Ladící systém Tronical Tune, převzato z [8]



Obr. 7: Roadie Tuner, převzato z [9]

Na internetu se také objevují domácí projekty automatických ladiček, založené na Arduinu. Příkladem jsou projekty dle [10] a [11], které jsou založeny na detekci a zpracování zvuku pomocí Arduina dle návodu ve zdroji [12]. Daný způsob je vhodný i pro účely této práce. Otáčení ladícími kolíky je v obou případech řešeno servomotorem.

3 NÁVRH ELEKTRONICKÉ LADIČKY

Při návrhu automatické elektronické ladičky je důležité zaměřit se na čtyři hlavní aspekty:

- 1) Snímání zvuku z nástroje
- 2) Zpracování a analýza zvuku
- 3) Vizualizace ladění
- 4) Ladění

3.1 Snímání zvuku

Zvukové vlnění je mechanické vlnění v určitém pružném prostředí o periodickém průběhu. Každému tónu náleží určitá frekvence, a tím pádem také určitá perioda. U drnkacích nástrojů se zahraná struna rozvlní, toto vlnění je přenášeno na celý nástroj a ten díky své konstrukci vydá tón (rozvlní vzduch kolem sebe), který se šíří prostředím a je možné jej slyšet (rozvlnění ušního bubínku). Snímače zvuku toto mechanické vlnění (akustický signál) převádí na střídavý elektrický signál, který je možné dále analyzovat a zpracovat. Jedná se tedy o elektroakustické měniče. V oblasti snímání zvuku se u ukulele nabízejí tři možnosti.

3.1.1 Piezoměnič

První možností je snímat zvuk pomocí piezo snímače nebo kontaktního mikrofону. Tyto dva typy snímačů fungují na základě piezoměniče. Jedná se o tenký mosazný plíšek, na který je přilepen piezokrystal.

Tento způsob snímání zvuku funguje díky piezoelektrickému jevu, kdy při deformaci krystalu dochází k výskytu povrchového elektrického náboje. Tudiž vzniká elektrostatické pole o určité elektrické intenzitě, která „závisí na plošné povrchové hustotě nábojů a na vzdálenosti nábojů uvnitř materiálu“ [13]. K dosažení piezoelektrického jevu je potřeba vhodná krystalová mřížka, ve které se po deformaci symetrické rozmístění nábojů změní na nesymetrické a tím vznikne elektrický náboj. Typickým příkladem materiálu s takovou mřížkou je křemen (SiO_2), tzv. piezoelektrická keramika na bázi tuhých roztoků PbTiO_2 (titaničitan olovnatý) a PbZrO_3 (zirkoničitan olovnatý) a řada dalších piezoelektrických látek. [13]

Na mosazný plíšek i piezokrystal piezoměniče jsou připájeny dráty, mezi kterými lze naměřit napětí díky rozdílným elektrickým potenciálům plíšku a krystalu (ten svůj potenciál mění podle deformace). Piezoměnič tedy mění vibrace nástroje (mechanické vlnění) na elektrický signál v podobě elektrického napětí s odpovídajícím časovým průběhem.

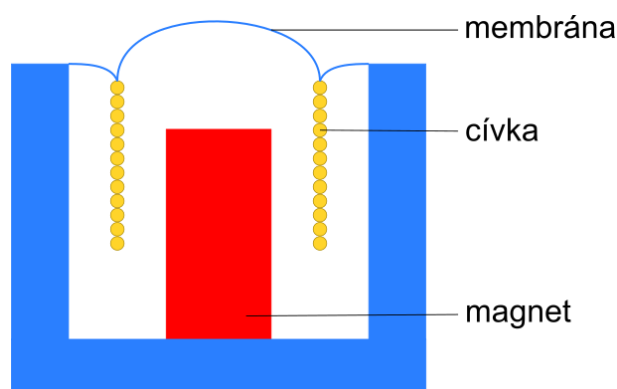
Piezo snímač je nejčastější ve dvou provedeních. Nalepovací piezo snímač má kulatý tvar a lepí se přímo na tělo nástroje poblíž kobyly, kde jsou vibrace nej přesnější. Jedná se o pouzdro z vhodného materiálu pro přenos vibrací (u levnějších tvrdý plast, u dražších kov), obsahující piezoměnič. K lepení se používá speciální lepicí hmota, která

je uzpůsobena k co nejlepšímu přenosu vibrací na snímač. Druhé provedení piezo snímače je v podobě „tyčinky“ která se instaluje přímo pod kobylku. Piezo snímače obvykle disponují zásuvkou 6,3 mm jack. Jsou velice přesné a z nich získaný signál nemůže být ovlivněn ruchy okolí, avšak pro účely elektronické ladičky není ani jedno provedení vhodné kvůli jeho složitější instalaci.

Kontaktní mikrofony mají podobu klipsu (podobně jako u klipsových ladiček), ve kterém je piezoměnič. Výstup je většinou mono vidlice 6,3 mm jack. Mikrofon se jednoduše připevňuje na hlavu nástroje, odkud snímá vibrace. Cena kontaktního mikrofону se pohybuje od 100 Kč výše. Je jedním z vhodných řešení snímání zvuku pro elektronickou ladičku pro snadnou instalaci a neovlivnitelnost okolními ruchy.

3.1.2 Dynamický mikrofon

Dynamický mikrofon funguje na principu elektromagnetické indukce. Zvukové vlny šířené vzduchem naráží na membránu, která je spojena s vodivou cívkou (obvykle měděnou), jak je vidět na obr. 8. Vlivem vibrací membrány se cívka pohybuje v magnetickém poli magnetu. Konstrukce je navržena tak, aby se cívka pohybovala pouze v jedné ose. Při pohybu v magnetickém poli lze naměřit na koncích cívky časově proměnné elektrické napětí. Časový průběh napětí je totožný s časovým průběhem zvukového signálu. Konce cívky jsou prodlouženy dráty a slouží jako výstup mikrofónu, který je řešen pomocí vidlice 3,5 mm jack, vidlice 6,3 mm jack nebo XLR. [14, 15]



Obr. 8: Schéma dynamického mikrofónu

Dynamický mikrofon je vhodný pro elektronickou ladičku z důvodu snadného použití, avšak jím poskytovaný elektrický signál může být zkreslen okolními ruchy a oproti mikrofónům s piezoměničem má nižší citlivost a poměrně malé výstupní napětí.

3.1.3 Snímače integrované v nástroji

Elektrické nástroje mají senzory fungující na principu elektromagnetické indukce. Skládají se z magnetů (jeden magnet na jednu strunu) a kolem nich navinuté cívky. Struny jsou kovové a při vibracích mění magnetické pole tvořené magnetem, a tak se v cívkě indukuje časově proměnné napětí se stejným časovým průběhem, jaké má mechanické vlnění strun. Tím je chvění strun převáděné přímo na elektrický signál bez nutnosti vzniku

zvuku. Elektrický signál je v nástroji obvykle zesílen integrovaným zesilovačem a výstup je zajištěn zásuvkou 6,3 mm jack. [16]

Elektrická ukulele se nevyskytují příliš často, ale elektroakustická jsou naprosto běžná. Senzory elektroakustických nástrojů jsou realizovány pomocí piezo snímačů umístěných zevnitř nástroje poblíž kobyly nebo přímo pod kobyly. Kobyla přenáší vibrace strun na tělo nástroje a tím pádem jsou vibrace v její blízkosti nástroje nejvíce shodné s vibracemi strun. Piezoměnič vytváří elektrický signál, jak je popsáno v kapitole 3.1.1, ten je většinou zesilován zabudovaným zesilovačem a výstup je zajištěn zásuvkou 6,3 mm jack.

Integrované snímače poskytují velice přesný, ničím nezkreslený a (díky zabudovaným zesilovačům) poměrně silný elektrický signál, což je velice vhodné pro realizaci elektronické ladičky. Nicméně je tento způsob snímání zvuku zřejmě použitelný jen pro elektrické a elektroakustické nástroje, což je značně limitující a omezuje to univerzálnost ladičky. Zesilovače je také nutné napájet, typicky devítivoltovou baterií. Co se týče ceny, tak pro majitele elektroakustických ukulele by se jednalo pouze o koupi kabelu, kterým by propojili ladičku a nástroj. Ten se dá pořídit za cca 100 Kč.

3.2 Zpracování a analýza zvuku

Analýza zvuku, a následné operace, jako je vizualizace stavu naladění a ladění samotné, budou řízeny pomocí platformy Arduino.

3.2.1 Arduino

Arduino je open-source platforma, která je určená jak začátečníkům, tak pokročilým programátorům. Desky Arduino se dají snadno programovat díky poměrně jednoduché syntaxi programovacího jazyka Wiring, který je založen na C++, a nabízí příjemné vývojové prostředí, založené na Processing (výukový programovací jazyk). K PC se Arduino připojuje pomocí USB kabelu a programuje se přes aplikaci „Arduino IDE“, která je volně dostupná na oficiálním webu Arduina (<https://www.arduino.cc/>). Vývoj této platformy začal v roce 2005 v Itálii v Interaction Design Institute. Cílem bylo vytvoření cenově dostupné a jednoduché vývojové sady se zaměřením hlavně pro studenty. Arduino se stalo oblíbenou platformou a díky zveřejnění schémat a návodů tvůrci se na trhu objevilo také mnoho klonů originálního Arduina, které jsou kompatibilní s veškerými doplňky, kterými může být Arduino rozšířeno. Zásadní jsou moduly (shieldy), umožňující rozšíření konektivity, připojení paměťových zařízení či usnadňující připojení motorů nebo displeje. Arduino i jeho doplňky předčí konkurenci také v ceně (což je dáno i výskytem již zmíněných klonů). [17, 18]

Arduino nabízí mnoho typů desek lišících se rozměry, počty analogových a digitálních pinů i možnostmi konektivity. Pro projekt elektronické ladičky byl zvolen typ Arduino UNO R3, které má dostatečný počet vstupů a výstupů (6 analogových vstupů a 14 digitálních vstupů/výstupů). Nabízí také I²C sběrnici, která usnadňuje připojení LCD displeje a 10 bitový A/D převodník. UNO je možné napájet stejnosměrným napětím

(7 - 12 V) nebo přes USB konektor (5 V), má 32 kB flash paměti pro uložení programu a taktovací frekvenci 16 MHz. Hmotnost je 25 g a rozměry 69 x 54 mm. [19]



Obr. 9: Klon Arduino UNO, převzato z: <http://www.robotistan.com>

Konkrétně je pro sestavení elektronické ladičky použit klon desky Arduino UNO (k vidění na obr. 9) s čipem ATmega328P, kterým disponuje i originální Arduino UNO R3. Parametry klonu jsou tedy shodné s parametry originálního Arduina při nižších pořizovacích nákladech.

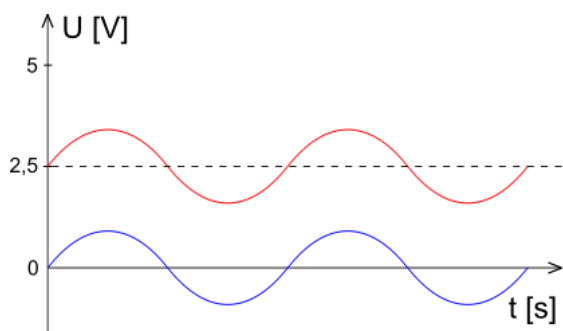
3.2.2 Úprava elektrického signálu

Před prací s informacemi ze snímače zvuku bude nutné elektrický signál upravit pro potřeby vstupu do Arduina.

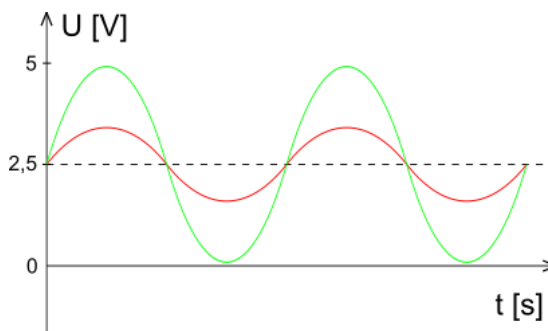
Snímače poskytují elektrický signál v podobě časově proměnného napětí. Střední hodnotou tohoto signálu je 0, takže napětí nabývá jak kladných, tak záporných hodnot. Analogové vstupy Arduina však se záporným napětím pracovat neumí, jsou schopné měřit napětí od 0 do 5 V. Tudíž je nutné posunout střední hodnotu z 0 V na 2,5 V, aby byla uprostřed spektra, s kterým je Arduino schopné pracovat. Příklad tohoto posunutí je na obr. 10, kde modrý signál je signál přijatý ze snímače zvuku a červený signál je již posunutý.

Výstupní napětí piezo snímače a elektromagnetické snímače elektrických kytar se pohybuje obvykle v rozmezí ± 100 až ± 250 mV. Takové napětí neumožní dostatečné rozlišení A/D převodníku, protože ten pracuje s hodnotami analogového signálu 0 až 5 V (pro 10 bitový převodník: 0 V odpovídá hodnotě 0 v digitálním signálu a 5 V odpovídá hodnotě 1023 v digitálním signálu). Pro lepší rozlišení je tedy potřeba takový rozkmit, kterým bude pokrytá co největší část spektra mezi 0 a 5 V při střední hodnotě 2,5 V. V ideálním případě by měl signál dosahovat amplitudy přesně 2,5 V. S nižší amplitudou by došlo ke snížení rozlišení a s vyšší by mohlo dojít k poškození Arduina. Princip zesílení signálu je znázorněn na obr. 11, kde červený signál je nezesílený a zelený je zesílený.

K úpravě vstupního signálu bude použit elektronický obvod, složený z neinvertujícího zesilovače, který signál nejprve zesílí a části, která poté posune střední hodnotu napětí, založené na schématu dle [12].

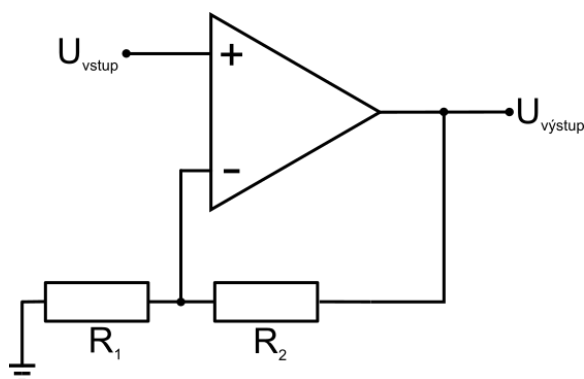


Obr. 10: Posunutí střední hodnoty signálu



Obr. 11: Zesílení signálu

Neinvertující zesilovač umožňuje zesílit vstupní napětí a jeho základem je operační zesilovač (OZ), což je malý integrovaný obvod se dvěma vstupy a jedním výstupem, k jehož napájení je zapotřebí zdroje symetrického napětí, aby zesilovaný signál i zesílený signál mohl mít jak kladné, tak záporné hodnoty, což je v případě signálu, který reprezentuje zvuk, zásadní. Pro obvod je vhodný například běžně využívaný OZ TL082, který je běžně dostupný v pouzdře po dvou, celá součástka vyžaduje symetrické napájení ± 18 V. OZ je v neinvertujícím zesilovači doplněn o 2 rezistory, z nichž jeden slouží jako zpětná vazba (propojení výstupu a vstupu OZ, tzn. korekce zesílení) a druhý spojuje zesilovač se zemí, jak je vidět na obr. 12. [20, 21]



Obr. 12: Schéma zapojení neinvertujícího zesilovače

Pro výpočet neinvertujícího zesilovače se uplatňuje rovnice (1), kde U_{vstup} je vstupní napětí, které do obvodu dodává snímač zvuku, $U_{výstup}$ je požadované zesílené napětí, R_1 je odpor rezistoru, který spojuje OZ se zemí a R_2 je odpor rezistoru zpětné vazby. Dle tohoto vzorce je při uvažování vstupní hodnoty napětí ± 100 mV (kterou dle měření na osciloskopu poskytuje snímač elektroakustického ukulele) vhodnou kombinací odporů např. $R_1 = 5,6$ k Ω a $R_2 = 100$ k Ω . Ta zajistí výstupní napětí $\pm 1,9$ V, které se blíží potřebným $\pm 2,5$ V a dává dostatek prostoru pro případ vyššího napětí na výstupu z ukulele. [20]

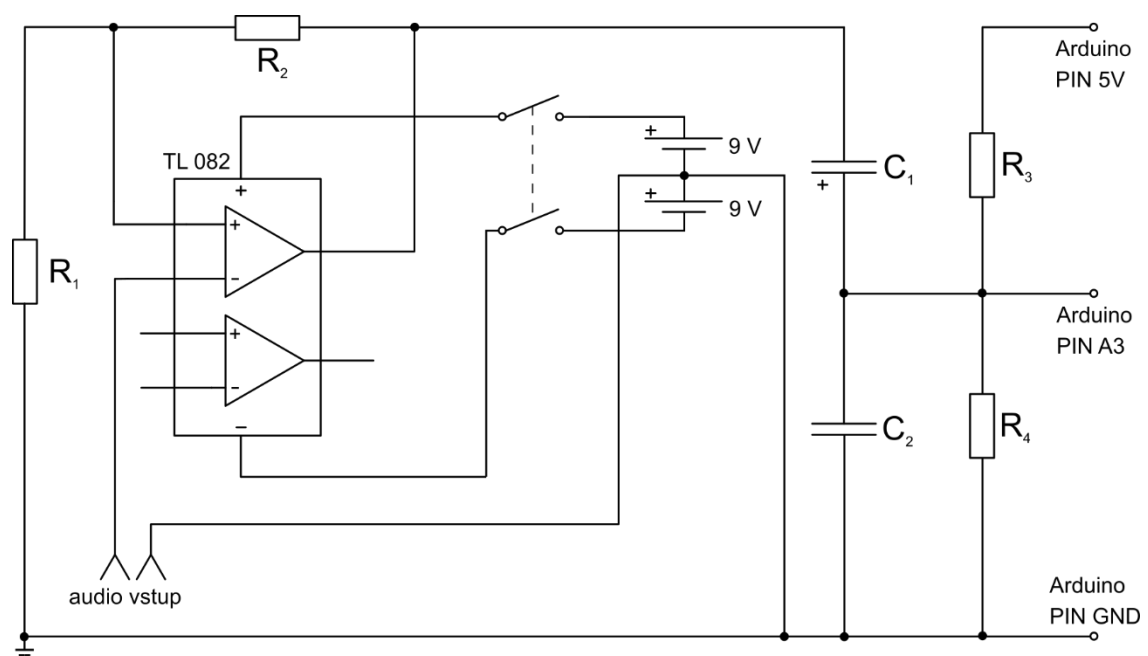
$$\frac{U_{výstup}}{U_{vstup}} = \frac{R_1 + R_2}{R_1} \quad (1)$$

Část obvodu, která posouvá střední hodnotu napětí, je složena ze dvou rezistorů a dvou kondenzátorů. Rezistory jsou zapojeny v sérii a slouží jako dělič napětí. Zdrojem je v tomto případě Arduino s napětím 5 V. Oba rezistory mají stejný odpor 100 kΩ a tím je na obou rezistorech stejné napětí 2,5 V podle vzorců (2) a (3), kde U_3 a U_4 jsou napětí na rezistorech, R_3 a R_4 jsou odpory rezistorů a U je napětí na zdroji. Mezi rezistory je zapojen výstup ze zesilovače přes kondenzátor s kapacitou $C_1 = 10 \mu F$, který je propojen se zemí kondenzátorem s kapacitou $C_2 = 100 nF$, dle [22]. Toto zapojení umožňuje, díky nabíjení a vybíjení 10 μF kondenzátoru a jeho výstupu přivedeného na uzel, kde je napětí 2,5 V, posun střední hodnoty z 0 na 2,5 V. Zapojení této části obvodu je na obr. 13, v rámci kompletního schématu elektrického obvodu, který upravuje signál pro vstup do Arduina. [12, 23]

$$\frac{U_3}{U_4} = \frac{R_3}{R_4} \quad (2)$$

$$U = U_3 + U_4 \quad (3)$$

Do obvodu (schéma na obr. 13) je přidáno napájení OZ a dvoupólový vypínač pro vypnutí tohoto napájení. Napájení OZ je zajištěno dvojicí symetricky (vůči zemi) zapojených devítivoltových baterií, které tak poskytují OZ napětí ± 9 V, což je pro napájení TL 082 dostačující, neboť je využíván pouze jeden ze dvou OZ v pouzdře. Jedna z baterií dále poslouží také k napájení Arduina a krokového motoru. Spojení zvukového snímače a obvodu je řešeno zásuvkou 6,3 mm jack, která umožní připojení různých typů snímačů. Propojení obvodu a Arduina je realizováno podle schématu.



Obr. 13: Schéma zapojení obvodu upravujícího signál pro vstup do Arduina

3.3 Vizualizace naladění

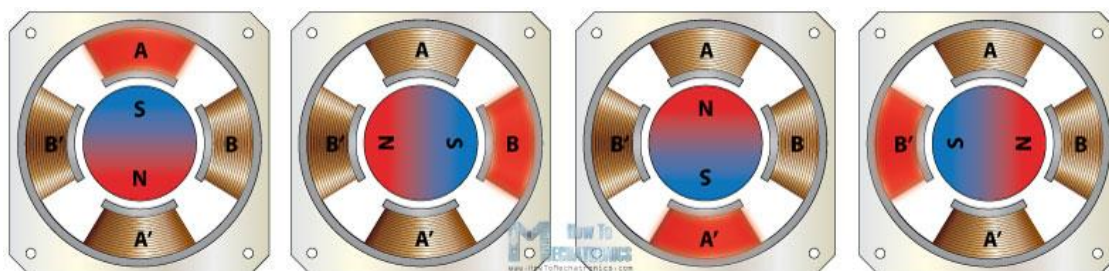
Vizualizace naladění strun slouží pro komunikaci mezi ladičkou a uživatelem. U běžných ladiček se pro tento účel využívají LED diody nebo LCD displeje. LCD displej má oproti LED diodám výhodu v poskytování většího množství informací (nejen stavu naladění), nabízí možnost základního uživatelského rozhraní a není nutné sestavovat další elektronický obvod pro jeho připojení k Arduino. Hojně využívané jsou dva základní LCD displeje: 16x2 (tzn. 16 znaků, 2 řádky) a 20x4 (20 znaků, 4 řádky). Existují dva způsoby připojení LCD displeje k Arduino: paralelní (vyžaduje k připojení 6 datových pinů) a sériový přes sběrnici I²C (postačí 2 datové piny označené jako SDA a SCL). Pro elektronickou ladičku je vhodný LCD displej 16x2 s I²C převodníkem, který nabízí dostatek prostoru pro informace, které je potřeba zobrazit a na Arduino UNO zabere pouze analogové piny A4 a A5. Pro komunikaci I²C převodníku displeje s Arduinem je potřeba speciální knihovna pro Arduino IDE. Ta je volně dostupná na internetu. [24]

3.4 Ladění

Ladění struny probíhá otáčením příslušného ladícího kolíku na hlavě nástroje. Toto otáčení je u automatické ladičky, která je předmětem této práce, zajištěno krokovým motorem. Výstupní hřídel motoru je s ladícím kolíkem spojena plastovou redukcí. Ovládání motoru je zajištěno řadičem připojeným k Arduino. Volba struny, která má být laděna, bude realizována membránovou klávesnicí se čtyřmi tlačítky, která se připojí k Arduino jakožto vstupní zařízení.

3.4.1 Krokový motor

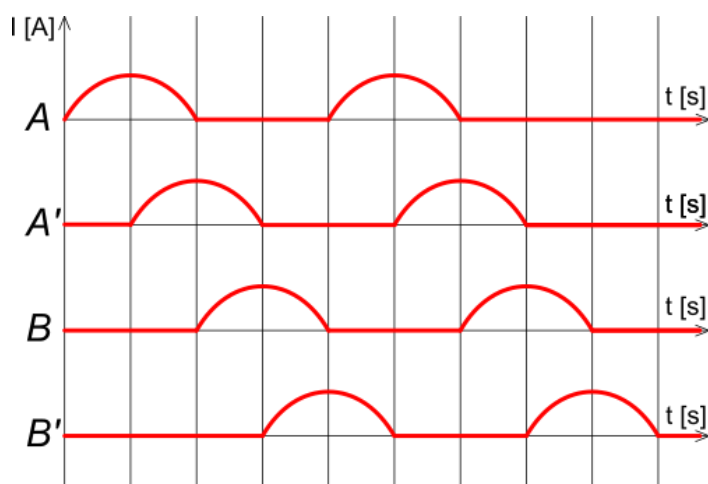
Krokový motor je synchronní elektrický motor, který umožňuje otočení o přesný počet kroků podle počtu digitálních impulsů (ty mohou být vytvořeny Arduinem), které jsou řadičem krokového motoru převáděny na elektrický signál. Je napájen stejnosměrným proudem. Hlavní části motoru jsou rotor, ke kterému je připojena výstupní hřídel a stator. Obecně je rotor permanentním magnetem a stator je tvořen několika páry cívek. Princip fungování je znázorněn na obr. 14, kde jsou cívky statoru v určitém pořadí napájeny, a tak kolem nich vzniká magnetické pole, které přitahuje magnetický pól rotoru, který se díky tomu otáčí. Vzhledem k pořadí napájení cívek se změní také směr otáčení rotoru.



Obr. 14: Princip fungování krokového motoru, převzato z [25]

Konfigurace na obrázku umožňuje 4 kroky na jednu otáčku, tzn. že každý krok je posunutí o 90° . Ke zjemnění kroků (tj. zvýšení rozlišení) a zvýšení kroutícího momentu se používají různé způsoby řízení motoru a vylepšení konstrukce rotoru i statoru. [25, 26]

K dosažení většího kroutícího momentu oproti řízení motoru na obr. 14, kde je vždy napájena jen jedna cívka, slouží řízení tzv. plným krokem. Kdy jsou vždy napájeny dvě sousedící cívky současně ($A+B - B+A'$ atd.). Tím se rotor posune do polohy mezi ně. Oproti obr. 14 jsou tedy jednotlivé polohy posunuty o 45° . Při tomto řízení nedojde ke zjemnění kroků a stále na jeden krok připadá 90° . Kroky se dají dvojnásobně zjemnit pomocí řízení polovičním krokem, kdy je se napájení jedné cívky střídá s napájením dvou sousedních cívek. Tedy $A - A+B - B - B+A'$ atd. Tím je dosaženo úhlu 45° na jeden krok. Většího zjemnění lze dosáhnout řízením pomocí mikrokrokování. V předchozích případech byly možné dva stavy: cívkou buď procházel proud nebo jí neprocházel. U mikrokrokování jsou pomocí řadiče krokového motoru cívky napájeny postupně. Průběh napájení je na obr. 15. Napájení jednotlivých cívek v čase se překrývá, což vede k větší plynulosti otáčení rotoru, zvýšení přesnosti a rozlišení (zmenšení úhlu na jeden krok). [25, 26]

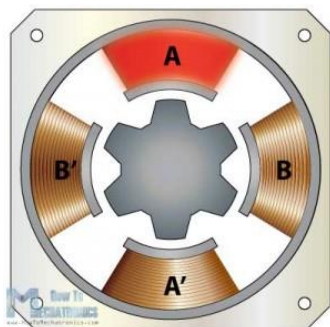


Obr. 15: Průběh napájení jednotlivých cívek při mikrokrokování

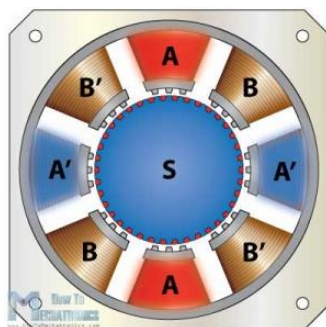
Dalším způsobem, který vede ke zvýšení rozlišení krokového motoru, je vytvoření více dvojic magnetických pólů na rotoru a přidání cívek do statoru.

Krokové motory mají 3 typy konstrukce. Prvním typem je motor s permanentním magnetem, u kterého je rotor permanentním magnetem a cívky statoru vytvářejí magnetické pole, které pól rotoru přitahuje. Tento typ byl použit výše pro obecný popis fungování krokových motorů. Jeho výhodou je vysoký točivý moment, ale nedokáže dosáhnout příliš vysokých rychlostí otáčení. Druhým typem je reluktanční motor (obr. 16). V tomto případě je rotor vyroben z magneticky měkkého materiálu a má zuby. Na jedné cívce (např. A) je vytvořena polarita a na cívce ležící naproti ní (A') je vytvořena polarita opačná. Tím se na blízkých zubech rotoru tvoří také polarity (stane se dočasným magnetem) a rotor se pootočí tak, aby mezi pólem cívky a pólem na zubu byla co nejmenší reluktance (magnetický odpor), tzn. natočí se tak, aby mezi cívkou a zubem byla

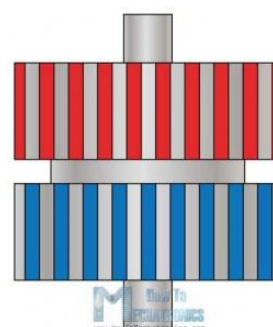
co nejmenší mezera. Výhodou tohoto typu motoru je vysoká rychlost otáčení, avšak s poměrně nízkým točivým momentem. Třetím typem je hybridní motor (obr. 17), který spojuje výhody obou předchozích typů. Rotor hybridního motoru má po obvodu zuby a je rozdělen do dvou částí podél osy otáčení. Jsou vůči sobě pootočené, jak je vidět na obr. 18, a mají rozdílné polaritu. Na cívkách statoru jsou také zuby. Dle obr. 17 při průtoku proudu vznikne na cívkách A polarita a na cívkách A' opačná polarita. Zuby rotoru se natočí k zubům statoru s opačnou polaritou. Tato konstrukce umožňuje až 400 kroků na otáčku (tj. $0,9^\circ$ na krok). [25, 26]



Obr. 16: Reluktanční motor, převzato z [25]



Obr. 17: Hybridní motor, pohled zepředu převzato z [25]



Obr. 18: Hybridní motor, pohled shora, převzato z [25]

Pro ladičku na ukulele byl zvolen krokový motor SX17-1005LQCEF od firmy Microcon. Jedná se o krokový motor s hybridní konstrukcí, který má 200 kroků na otáčku ($1,8^\circ$ na krok) a statický moment 0,52 Nm, což je dostačující, vzhledem k tomu, že maximální moment potřebný pro napnutí struny s největším průřezem při ladění je cca 0,1 Nm. Rozměry motoru jsou 42,3 x 42,3 x 40 mm. Výstupní hřídel motoru má délku 22 mm a průměr 5 mm. Motor má 4 vývody pro připojení k řadiči krokového motoru.

3.4.2 Řadič krokového motoru

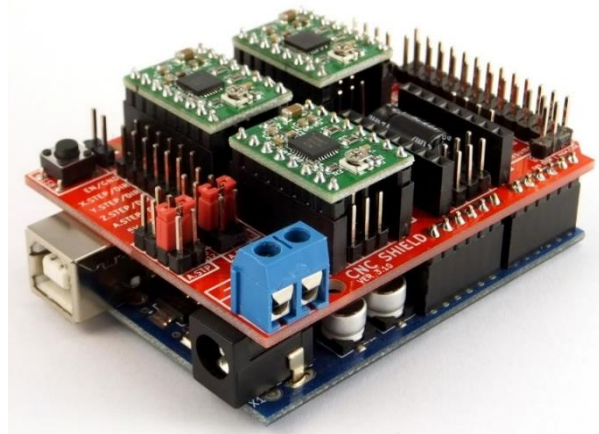
Řadič krokového motoru převádí digitální pulsy na analogový (elektrický) signál a upravuje jej podle nutného způsobu řízení krokového motoru. Jedná se o elektronický obvod, který zajišťuje dodávání potřebného proudu ze zdroje do jednotlivých cívek, umožňuje většinou různé způsoby řízení, od plných kroků až po mikrokrokování a tím i plynulejší rotaci rotoru motoru. Při používání krokového motoru s Arduinem je řadič nutností i z hlediska napájení motoru, neboť Arduino nedodává dostatečné napětí pro napájení motoru. K řadiči krokového motoru je tedy připojeno také napájení motoru. Samotný řadič je pak napájen Arduinem. [26, 27]

Pro účely této práce byl zvolen řadič A4988, který umožňuje napájení motoru 8 – 35 V. Sám řadič je napájen 3 – 5 V. Je vhodný pro bipolární motory, umožňuje rozlišení při mikrokrokování až 1/16 kroku. Disponuje ochranou proti přehřátí a proti zkratu. [28]

3.4.3 CNC shield

Pro připojení řadiče krokového motoru A4988 k Arduino je nutné vytvořit obvod s kondenzátorem a konektory pro připojení napájení pro motor.

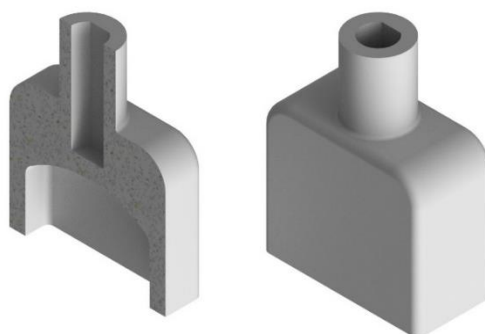
Alternativní možností je použít CNC shield, který se připojí přímo na Arduino a do něj je možné zapojit až 4 řadiče a motory, jak je vidět na obr. 19. Jeho rozměry jsou stejné jako rozměry Arduina UNO. Na shieldu je konektor pro připojení napájení pro motory. Vedle každého slotu pro řadič jsou 4 výstupní piny pro snadné připojení krokového motoru. Propojení Arduina s řadičem a motorem je tedy realizováno bez nutnosti pájení. CNC shield obsadí téměř všechny piny Arduina, ale ty jsou vyvedeny na shield a je možné je tedy nadále využít.



Obr. 19: CNC shield připojený k Arduino UNO se třemi připojenými řadiči A4988, převzato z: <http://blog.protoneer.co.nz/arduino-cnc-shield/>

3.4.4 Redukce pro spojení motoru a ladícího kolíku

Pro přenos kroutícího momentu z hřídele krokového motoru na ladící kolík slouží plastová redukce. Spojení hřídele a redukce je tvarového typu bez nutnosti dalších spojovacích součástí, neboť hřídel má v průřezu tvar kruhové úseče. Nejvhodnější způsob výroby redukce je 3D tisk vzhledem k nízkým nákladům. Jako vhodný materiál byl zvolen PLA, což je spolu s ABS nejběžnější materiál používaný v 3D tisku. Oproti ABS je však tužší, což je pro přenos kroutícího momentu výhodné. Podle rozměrů hřídele a ladícího kolíku byla navržena redukce v softwaru Autodesk Inventor 2017 (viz obr. 20).



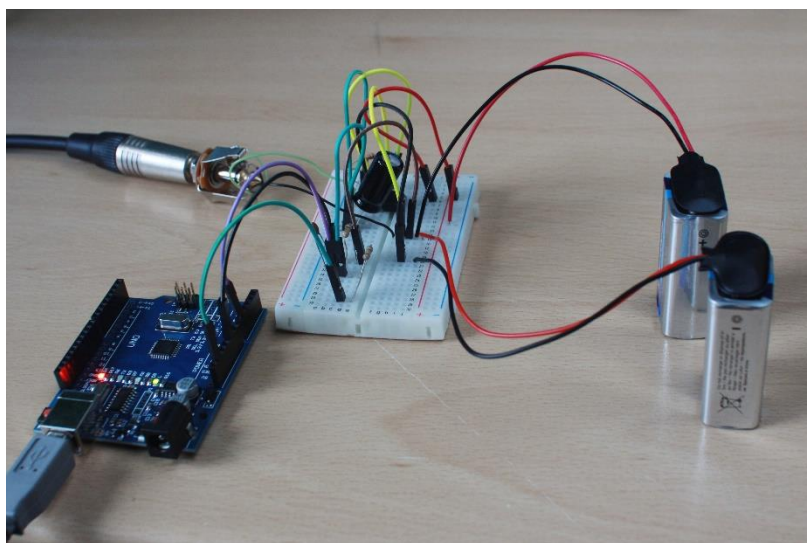
Obr. 20: 3D návrh redukce ke spojení krokového motoru a ladícího kolíku

4 REALIZACE ELEKTRONICKÉ LADIČKY

Prvním krokem při realizaci elektronické ladičky s automatickým laděním bylo sestavení elektronického obvodu, ověření jeho funkčnosti a jeho propojení se snímačem zvuku a s Arduinem. Arduino bylo programováno nejprve pro snímání zvuku a vyhodnocení frekvence vstupního signálu, která byla po připojení membránové klávesnice a LCD displeje v kódu využita pro vizualizaci ladění. Dalším krokem byla výroba redukce pro spojení hřídele krokového motoru a ladícího kolíku nástroje. Po připojení krokového motoru přes řadič a CNC shield k Arduinu byl v závislosti na vyhodnocené frekvenci naprogramován také pohyb motoru, a tím i samotné ladění. Funkčnost ladičky byla ověřena na tenorovém elektroakustickém ukulele. Posledním krokem bylo umístění komponentů do vhodné krabičky, určené pro elektronická zařízení. Při zapojování Arduina a jeho programování byla velice užitečná publikace [17].

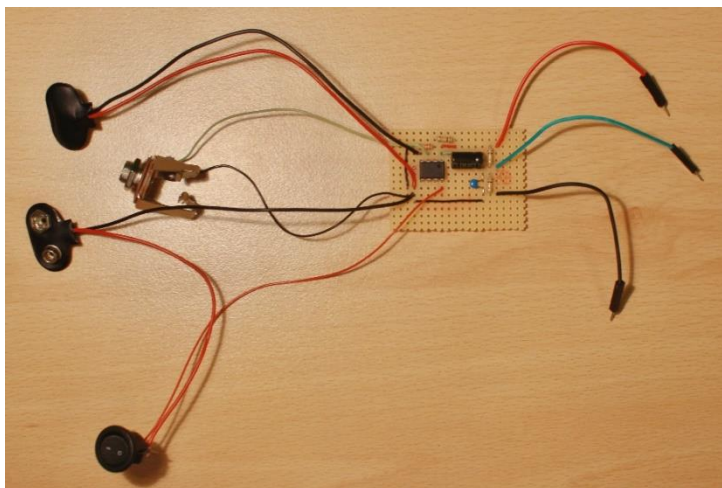
4.1 Sestavení elektronického obvodu

Elektronický obvod určený k úpravě vstupního signálu byl sestaven podle obvodu na obr. 13 nejprve na nepájivém poli a bez vypínače (obr. 21). Zapojení součástky operačního zesilovače TL082 bylo realizováno za pomoci jeho datasheetu. Funkčnost obvodu zapojeného na nepájivém poli byla ověřena pomocí funkčního generátoru a osciloskopu. Funkčním generátorem byla generovaná funkce sinus s frekvencí 440 Hz a napětíovou amplitudou 100 mV. Nejprve byla zkontrolována funkčnost zesilovací části obvodu (neinvertujícího zesilovače), která byla zapojena mezi generátor a osciloskop. Osciloskop zaznamenal vzrůst amplitudy signálu na hodnotu blíží se 1,9 V, což odpovídá vypočítaným parametrům neinvertujícího zesilovače. Poté byl mezi funkční generátor a osciloskop připojen celý obvod. Oproti předchozímu výsledku došlo, podle předpokladů, k posunutí střední hodnoty signálu z 0 V na hodnotu blízkou 2,5 V.



Obr. 21: Obvod na nepájivém poli připojený k Arduinu

Po ověření funkčnosti obvodu na nepájivém poli byly součástky obvodu a drátky pro jejich spojení osazeny na univerzální desku plošného spoje a připájeny dle schématu na obr. 13. Byla připájena zásuvka 6,3 mm mono jack pro připojení snímače zvuku, 3 drátky s konektorem pro připojení k pinům Arduina a 2 konektory pro zapojení 9 V baterií, jak je vidět na obr. 22.



Obr. 22: Výsledný obvod napájený na univerzální desce

4.2 Snímač zvuku

Ke snímání zvuku byl zvolen interní snímač ukulele a klipový mikrofon. Oba dva snímače je možné připojit přes 6,3 mm mono jack do obvodu upravujícího signál pro potřeby vstupu Arduina. Bylo zjištěno, že zvolený klipový mikrofon za 100 Kč kvalitativně nedostačuje, neboť příliš zkresloval vytvářený elektrický signál, a tudíž byl pro snímání zvuku využit přesnější piezo snímač integrovaný v ukulele.

4.3 Vyhodnocení stavu naladění struny Arduinem

Analogový signál ze snímače zvuku, upravený elektronickým obvodem, vstupuje do Arduina přes analogový pin A3. Na obr. 22 jsou tři drátky určené k připojení k Arduinu. Do pinu A3 vede zelený drát, červený drát je připojen do 5V pinu a černý drát do pinu GND. Pro vyhodnocení stavu naladění je nejprve nutné zjistit frekvenci vstupního signálu, což umožňuje pouze vhodná vzorkovací frekvence A/D převodníku.

4.3.1 Dosažení vhodné vzorkovací frekvence

Pin A3 má zabudovaný A/D převodník s rozlišením 10 bitů. To znamená, že je schopen analogový signál reprezentovat 1024 hodnotami (0 až 1023). V kódu se pro čtení hodnoty z analogového pinu používá funkce *analogRead()*, která však, dle [29], umožňuje vzorkovací frekvenci jen 10 kHz (čte hodnotu každých 100 μ s), což není pro vzorkování zvukového signálu dostatečné. Vzorkovací frekvence udává počet vzorků analogového

signálu, které A/D převodník převede na digitální signál za 1 s. Čím je vyšší vzorkovací frekvence, tím přesnější je reprezentace analogového signálu v digitální podobě. [12, 30]

V praxi se používá vzorkovací frekvence pro zvuk alespoň 32 kHz, běžnější je ale frekvence 44,1 kHz [30]. Bylo tedy nutné zvýšit vzorkovací frekvenci A/D převodníku. Toho je možné dosáhnout úpravou registrů ADCSRA a ADMUX.

Kód v Processingu má 2 základní části, první je funkce `setup()`. Do složených závorek se запиše kód, který proběhne na začátku programu. Druhá základní část je funkce `loop()`, kde se do složených závorek запиše kód, který probíhá neustále dokola, dokud není Arduino odpojeno od napájení. Úprava registrů ADCSRA a ADMUX probíhá v části `void setup()`. Zvýšení vzorkovací frekvence přinese snížení rozlišení převodníku na 8 bitů (hodnoty 0 až 255).

Při úpravě registrů je nutné nejprve zabránit obsluze přerušení, aby přerušila program, což zajistí příkaz `cli()` a příkaz `sei()` možnost přerušení znovu obnoví po nastavení registrů. Jak je vidět v kódu na následující straně, v registru ADMUX je nastaven pin A3 jako vstup a referenční voltáž je nastavena na 5 V, což znamená, že Arduino hodnotu 255 digitálního signálu přiřadí hodnotě 5 V analogového signálu. Výsledky A/D převodu jsou ukládány ve dvou 8 bitových datových registrech ADCH a ADCL. Při používání jen 8 bitů z 10 bitového A/D převodu je vhodné zarovnat jeho výsledky doleva, tak aby se daly načíst pro další použití v programu z registru ADCH bez nutnosti použití druhého registru ADCL, jak je vidět v tabulce 1. [12, 32]

Zarovnáno doprava								
Bit	15	14	13	12	11	10	9	8
ADCH	-	-	-	-	-	-	10. bit	9. bit
Bit	7	6	5	4	3	2	1	0
ADCL	8. bit	7. bit	6. bit	5. bit	4. bit	3. bit	2. bit	1. bit
Zarovnáno doleva								
Bit	15	14	13	12	11	10	9	8
ADCH	10. bit	9. bit	8. bit	7. bit	6. bit	5. bit	4. bit	3. bit
Bit	7	6	5	4	3	2	1	0
ADCL	2. bit	1. bit	-	-	-	-	-	-

Tab. 1: Porovnání zarovnání doprava a doleva

V kódu je dále vyčištěn registr ADCSRA, aby do něj mohly být zapsány nové hodnoty. V tomto registru je nastaven prescaler 32, který způsobí, že taktovací frekvence Arduina (16 MHz) je dělen hodnotou 32 a tím je dosaženo frekvence A/D převodníku 500 kHz. Dle [12] a [31] trvá převod jedné analogové hodnoty na digitální 13 taktů. Při frekvenci 500 kHz jeden takt trvá 2 μ s, převod jedné analogové hodnoty na digitální (13 taktů) pak tedy trvá 26 μ s, což je vzorkovací perioda. Vzorkovací frekvence je její převrácenou hodnotou, tedy 38,462 kHz, a to je již hodnota vhodná pro převod zvukového signálu. Pro dosažení konstantní vzorkovací frekvence je nutné zajistit, aby byly do

registru ADCH ukládány naměřené hodnoty z pinu A3 opravdu každých 26 μ s. To je možné za použití přerušení, které každých 26 μ s přeruší běh programu a načte novou hodnotu z A/D převodníku. Proto je v registru ADCSRA umožněno automatické spuštění A/D převodu a přerušení. Nakonec je v této části kódu umožněn a spuštěn A/D převod na pinu A3. [12, 33]

```
cli();//znemozni preruseni

ADMUX = 0x43; //nastavi A3 jako vstup

ADCSRA = 0; //vycisti registr ADCSRA

ADMUX |= (1 << REFS0); //nastavi referenci voltaz 5V
ADMUX |= (1 << ADLAR); //zarovnaní výsledku A/D převodu doleva

ADCSRA |= (1 << ADPS2) | (1 << ADPS0); //nastavi prescaler 32
ADCSRA |= (1 << ADSC); //umozni automaticke spusteni A/D převodu
ADCSRA |= (1 << ADIF); //umozni preruseni
ADCSRA |= (1 << ADEN); //umozni A/D převod
ADCSRA |= (1 << ADSC); //spusti A/D převod

sei();//umozni preruseni
```

4.3.2 Vyhodnocení frekvence vstupního signálu

Frekvence je v programu vypočítána z periody vstupního signálu dle rovnice (4), kde f je frekvence v Hz a T perioda v sekundách. Výpočet frekvence probíhá ve funkci `loop()`, kde je pak frekvence dále využita při vizualizaci naladění a při ladění.

$$f = \frac{1}{T} \quad (4)$$

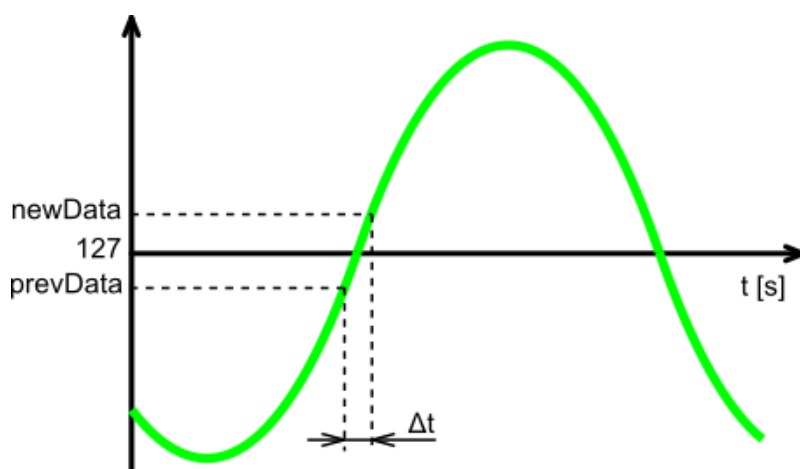
Perioda je určena v rámci přerušení z hodnot A/D převodníku, zapsaných v registru ADCH. Přerušení je v kódu spuštěno funkcí `ISR(ADCH_vect)`, která je určená přímo k přerušení pro práci s A/D převodníkem. Určení periody je založeno na porovnávání doby mezi překročeními střední hodnoty vstupního signálu v kladném směru a porovnávání směrnice přímk signálu při těchto překročeních, stejně jako v návodu [34].

Střední hodnota je v digitálním signálu reprezentovaná hodnotou 127. Pokud je tedy jedna hodnota získaná z A/D převodníku (ve kódu označená jako `prevData`) menší než 127 a následující hodnota (ve kódu označená jako `newData`) větší než 127, dochází k překročení střední hodnoty v kladném směru. K určení doby mezi těmito překročeními je použita proměnná `time`, která je navyšována o 1 při každém průběhu přerušení (tj. každých 26 μ s) dokud nedojde k dalšímu překročení střední hodnoty v kladném směru.

V blízkosti střední hodnoty zvukový signál tvoří přímku. Směrnici této přímky je možné určit dle vztahu (5) z rozdílu dvou po sobě jdoucích hodnot A/D převodu (`newData` a `prevData`) a času Δt , který vyjadřuje dobu mezi A/D převody těchto hodnot.

$$k = \frac{newData - prevData}{\Delta t} \quad (5)$$

Na obr. 23 je znázorněna ideální digitální reprezentace části analogového zvukového signálu s vyznačenými hodnotami *newData*, *prevData* a Δt , použitými pro výpočet směrnice přímky při přechodu střední hodnoty v kladném směru.



Obr. 23: Hodnoty pro výpočet směrnice přímky

K porovnání směrnic dvou přímek při překračování střední hodnoty postačí vyjádřit je pouze rozdílem dvou po sobě jdoucích hodnot, neboť čas mezi dvěma po sobě jdoucími hodnotami Δt je dán vzorkovací periodou a je tedy konstantně 26 μs .

Pokud nastává překračování střední hodnoty v kladném směru, je nejprve nalezena oblast s co největší směrnicí přímek (nejprudčeji stoupající přímky). Ta odpovídá oblasti s nejvyšším rozkmitem, a tudíž nejsilnějším signálem, což umožní jeho co nejpresnější analýzu. Pro tuto oblast je pak vyhodnocena perioda. Hodnoty doby mezi překročeními střední hodnoty v kladném směru (dále jen „doba překročení“), resp. hodnoty směrnic přímek (dále jen „směrnice“) jsou ukládány do polí *timer[]*, resp. *slope[]*. Při prvním přechodu střední hodnoty v kladném směru v oblasti nejsilnějšího signálu jsou do těchto polí uloženy referenční hodnoty pod indexem 0. Při každém dalším přechodu jsou pak hodnoty směrnice a doby překročení porovnávány s referenčními hodnotami. Pokud dojde ke shodě jak směrnic, tak dob překročení, jedná se o signál s periodickým průběhem a stálou periodou. Shoda nemusí být vždy úplně přesná, neboť signál z hudebního nástroje není dokonalý a je zkreslený také A/D převodem. Z toho důvodu jsou v programu nastaveny experimentálně ověřené tolerance, které umožní eliminaci těchto chyb.

Perioda samotná je pak určena součtem pole *timer[index]*, které je naplněno proměnnou *time*. Ta vyjadřuje počet přerušení mezi jednotlivými překročeními střední hodnoty v kladném směru. Perioda (v kódu pod proměnnou *perioda*) tedy vyjde jako násobek 26 μs . To je nutné zohlednit v přepočtu periody na frekvenci, neboť při výpočtu frekvence dle rovnice (4) má být perioda v sekundách. Rovnice (6) je finální vzorec pro výpočet frekvence, kde perioda je hodnota proměnné *perioda* a *f* je frekvence v Herzích.

$$f = \frac{38462}{perioda} \quad (6)$$

4.3.3 Vyhodnocení stavu naladění

Vyhodnocení stavu naladění struny je založeno na porovnání referenční frekvence struny (frekvence struny při správném naladění) s aktuální frekvencí zvukového signálu. Přehled referenčních frekvencí jednotlivých strun a jim odpovídajících tónů je v tabulce 2.

Struna	Tón	Referenční frekvence
1 (G)	G4	392,00 Hz
2 (C)	C4	261,63 Hz
3 (E)	E4	329,63 Hz
4 (A)	A4	440,00 Hz

Tab. 2: Referenční frekvence strun, hodnoty dle [35]

Frekvence vstupního signálu vypočítaná podle rovnice (6) je v kódu označena jako *frekvstup*. Na jedno drnknutí na strunu připadají desítky hodnot frekvence, neboť tón, který vytváří ukulele, trvá podstatně déle než interval, ve kterém *frekvstup* nabývá nových hodnot. Kontrolním výpisem hodnot na sériový port bylo zjištěno, že *frekvstup* nenabývá při jednom drnknutí konstantních hodnot, což je způsobeno nepřesností snímače a zkrácením A/D převodníku. Nicméně hodnota odpovídající skutečnosti se vyskytovala nejčastěji. Proto byla vytvořena funkce *cetnost()*, kterou je vyšetřována nejčastěji se vyskytující frekvence z 30 hodnot *frekvstup*. Výstupem je proměnná *frekvence*, jejíž hodnota odpovídá hodnotě skutečné frekvence zahrané struny, což bylo experimentálně ověřeno.

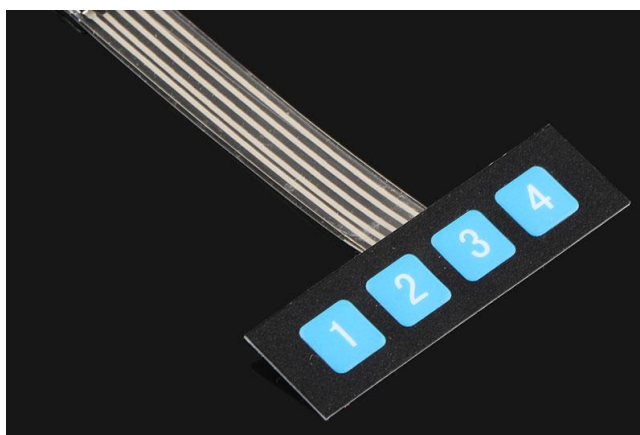
Proměnná *frekvence* je porovnána s proměnnou *frekRef*, která reprezentuje referenční frekvenci právě laděné struny. Pokud jsou tyto frekvence shodné, je nástroj naladěn. Dosáhnout úplné shody je z důvodu A/D převodu téměř nemožné, neboť získaný digitální signál není spojitý, a tak není možné vyšetřit úplně přesnou hodnotu skutečné frekvence. Tudíž je shoda posuzována pomocí rozdílu *frekvence* a *frekRef* a pokud je tento rozdíl, uložený v proměnné *rozdil*, menší nebo roven toleranci přesnosti naladění (která činí 2 Hz), je frekvence struny uznána jakožto shodná s frekvencí referenční a struna je tedy naladěna. Pokud je *rozdil* větší než tolerance přesnosti naladění, proběhne při dalším drnknutí na strunu nové načítání hodnot z A/D převodníku, nový výpočet proměnné *frekvstup*, určení *frekvence* z jejích 30 hodnot a nové posouzení, zda je struna naladěna, či nikoliv. Tento cyklus probíhá, dokud není struna naladěna.

4.4 Výběr laděné struny a vizualizace naladění

Tato kapitola pojednává o realizaci komunikace mezi uživatelem a ladičkou, kdy uživatel zadává, kterou strunu potřebuje naladit a ladička poskytuje zpětnou vazbu ohledně ladění. Je zde popsáno připojení membránové klávesnice jakožto vstupního zařízení k Arduino a připojení LCD displeje pomocí sběrnice I²C a jeho ovládání.

4.4.1 Klávesnice

K výběru struny, která má být naladěna, slouží membránová klávesnice se čtyřmi tlačítky v řadě, viz obr. 24. Klávesnice má pět vývodů. Čtyři z nich slouží k připojení jednotlivých tlačítek k digitálním pinům Arduina a jeden se připojí ke GND pinu. Klávesnice byla připojena k digitálním pinům D6 (tlačítko 1), D7 (tlačítko 2), D9 (tlačítko 3) a D10 (tlačítko 4). Čísla na klávesnici odpovídají číslům jednotlivých strun (1 – G, 2 – C, 3 – E, 4 – A).



Obr. 24: Membránová klávesnice, převzato z <http://robotstore.cz>

Ve zdrojovém kódu jsou piny D6, D7, D9 a D10 nadefinovány příkazem `pinMode()` jako `INPUT_PULLUP`. Při nestisknutém tlačítku je logická hodnota na pinu 1, při stisknutí 0. Na základě vybrané struny stiskem tlačítka se na displeji zobrazí obrazovka ladění příslušné struny a do programu je zavedena referenční hodnota frekvence laděné struny. S tou bude porovnávána frekvence vstupního signálu.

4.4.2 LCD displej

Pro účely elektronické ladičky byl zvolen šestnáctiznakový, dvouřádkový LCD displej s I²C převodníkem. I²C převodník je k zadní straně displeje připájen šestnácti piny a k Arduinu je připojen čtyřmi piny. Dva z nich jsou analogové. Jedná se o pin SDA, připojený na pin A4 a pin SCL, připojený na pin A5. Další dva jsou pak označené jako VCC, připojený do 5V pinu, a GND, připojený do GND pinu. [36]

Pro komunikaci Arduina s displejem připojeným přes I²C převodník byla do programu zahrnuta speciální knihovna *LiquidCrystal_I2C*, určená k ovládání displeje, a knihovna *Wire*, která je defaultní součástí Arduino IDE a umožňuje komunikaci přes I²C sběrnici. Díky knihovně *LiquidCrystal_I2C* lze displej ovládat jednoduchými příkazy, jako jsou `lcd.begin()`, kterým se spustí práce s displejem, `lcd.print()`, který na displej zobrazuje text nebo předem nadefinované znaky, či `lcd.setCursor(sloupec,řádek)` kterým se volí pozice na displeji, na kterou chceme příslušné znaky zobrazit. [36]

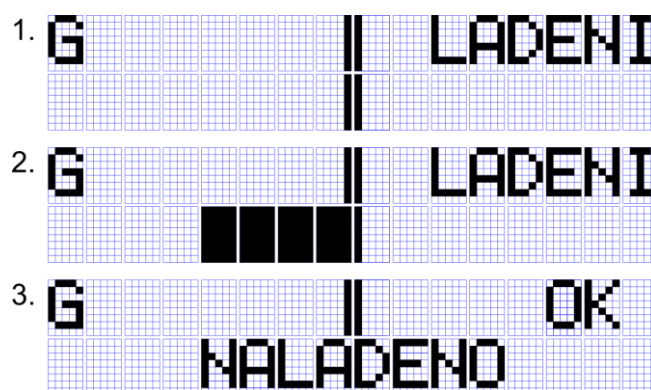
I²C sběrnice umožňuje sériové připojení více displejů. Pro tyto případy musí mít každý displej svoji adresu, aby bylo možné nadefinovat, s kterým displejem má Arduino právě komunikovat. Adresa je určena podle propojení tří propojek na I²C převodníku

displeje, které jsou označeny jako A0, A1 a A2. U použitého I²C převodníku není propojena jediná propojka, tím pádem je adresa v hexadecimální formě 0x27. [36]

Účelem displeje u elektronické ladičky je zobrazit úvodní obrazovku, výzvu k výběru struny pomocí klávesnice a v závislosti na výběru struny pak obrazovku, kde se bude zobrazovat stav naladění při ladění.

Na úvodní obrazovce je zobrazen text „VÍTEJTE!“, po kterém následuje výzva k výběru struny k ladění. Tyto zprávy lze na displeji zobrazit jednoduše pomocí již zmíněného příkazu *lcd.print()*. Do závorek se napíše požadovaný text v uvozovkách. V kódu je úvodní zpráva ve funkci *setup(){}*, protože probíhá jen jednou při spuštění ladičky. Výzva k výběru struny je již v části *loop(){}*.

Na obr. 25 je návrh obrazovky ukazující stav naladění při ladění samotném. Při stisku příslušného tlačítka na klávesnici po výzvě k výběru struny se zobrazí obrazovka č. 1. V levém horním rohu je písmeno reprezentující laděnou strunu (jako příklad uvedena struna G). V pravém horním rohu je uživatel informován o tom, že ladička pracuje a provádí ladění. Uprostřed jsou linky symbolizující referenční frekvenci struny. Uživatel drnkne na strunu a program vyhodnotí, zda je struna naladěná či nikoliv. Pokud je struna podladěna (frekvence zahraného tónu je nižší než referenční frekvence), zobrazí se plná políčka směrem doleva od linek symbolizujících referenční frekvenci, jak je vidět na obrazovce č. 2. V tomto případě musí být struna utažena. Na každé políčko připadá rozdíl 3 Hz. V případě překročení rozdílu 24 Hz (8 políček) se zobrazí právě 8 políček. Pokud je struna nadladěna (frekvence zahraného tónu je vyšší než referenční frekvence), políčka se na stejném principu zobrazují směrem doprava. V tomto případě musí být struna povolena. Když je frekvence tónu struny shodná s referenční hodnotou, tzn. struna je naladěna, zobrazí se obrazovka č. 3.



Obr. 25: Návrh obrazovky stavu naladění

Pro účely vizualizace naladění bylo nutné vytvořit speciální znaky, jako jsou středové linky a plná políčka. Vytváří se pomocí příkazu *lcd.createChar(číslo,pole)* ve funkci *setup(){}*. Parametry jsou číslo, které přidělíme příslušnému znaku a název pole typu byte o osmi položkách, které definují znak. Toto pole lze vygenerovat např. pomocí webového generátoru na adrese <http://maxpromer.github.io/LCD-Character-Creator/>. Příkazem *lcd.print((char)číslo)* je na displeji zobrazen znak s příslušným číslem.

4.5 Výroba redukce pro spojení hřídele motoru a ladícího kolíku

3D model redukce pro spojení hřídele motoru a ladícího kolíku z kapitoly 3.4.4 určený pro 3D tisk byl navrhnout přesně podle rozměrů hřídele a ladících kolíků. Byl zkušebně vytisknut, aby bylo možné vyhodnotit smrštění materiálu zejména v otvoru určenému pro hřídel, neboť hřídel v něm musí být uložená natěsno, aby nedocházelo k jejímu protáčení v redukci. Na prvním vytisknutém modelu bylo naměřeno smrštění v otvoru pro hřídel cca 21 %. Podle tohoto výsledku byly upraveny rozměry modelu a redukce byla znovu vytištěna. V tomto případě již měla hotová součástka potřebné rozměry s malou vůlí mezi hřídelí a redukcí, která způsobovala pouze posuv redukce v ose hřídele. Pro zamezení posuvu bylo použito tavné lepidlo. Výsledná podoba redukce po nasazení na hřídel krokového motoru je na obr. 26.



Obr. 26: Krokový motor s redukcí vytištěnou na 3D tiskárně

Redukce byla vytištěna na 3D tiskárně Rostock MAX™ v2 z materiálu PLA stříbrné barvy (tisková struna o průměru 1,75 mm). Tloušťka tisknuté vrstvy byla 0,1 mm. Tisk trval cca 100 minut. Na redukcí bylo spotřebováno 7 g materiálu. Se zkušebním modelem tedy celkem 14 g, čemuž odpovídá cena 7 Kč při uvažování ceny stříbrného PLA 500 Kč/kg.

4.6 Ladění krokovým motorem

Pro připojení krokového motoru SX17-1005LQCEF slouží CNC shield, který byl jednoduše připojen k Arduinu. Pro připojení řadiče motoru je využita pozice CNC shieldu označená jako X. Při zapojování řadiče A4988 bylo nutné dbát na to, aby souhlasily piny na CNC shieldu s piny řadiče. Motor je připojen na čtyři piny vedle pozice pro řadič. Při zapojení jen jednoho řadiče bez chlazení nebo zarážek např. v podobě tlačítka (což jsou prvky využívané např. u 3D tiskáren) CNC shield využívá pouze 3 digitální piny Arduina. V případě pozice X jsou to piny D8 (v programu označený jako EN), sloužící pro zahájení

komunikace s motorem, D5 (*DIR*), sloužící pro určení směru otáčení a D2 (*STEP*), sloužící ke krokování. Tyto piny jsou nejprve nadefinovány jako *OUTPUT*, tedy výstupní. Motor je ovládán pomocí příkazu *digitalWrite(pin, hodnota)*, což je defaultní příkaz Arduino IDE, který slouží k ovládání digitálních pinů. Za parametr pin se dosazuje číslo příslušného digitálního pinu nebo jeho reprezentující proměnná (*EN*, *DIR*, *STEP*). Za parametr hodnota se pak dosazuje *LOW* reprezentující 0 V na pinu nebo *HIGH*, reprezentující 5 V na pinu.

Napájení krokového motoru se připojuje přímo k CNC shieldu. Je realizováno jednou ze dvou 9 V baterií, které je součástí elektrického obvodu pro úpravu vstupního signálu. Tato baterie je připojena k napájecímu konektoru Arduina a k němu jsou připojeny dva drátky vedoucí do napájecích svorek CNC shieldu.

Ladění krokovým motorem probíhá současně s vizualizací naladění ve funkci *loop()*. Uživatel po volbě laděné struny přiloží motor s redukcí k ladicímu kolíku a drkně na strunu. Frekvence signálu ze snímače zvuku je, stejně jako v případě vizualizace, vyhodnocena Arduinem. Z jejího porovnání s referenční frekvencí příslušné struny, reprezentovaného proměnnou *rozdil*, dochází k určení počtu kroků, které má krokový motor vykonat a k určení směru jeho otáčení. Směr otáčení je určen podle toho, zda je proměnná *rozdil* kladná či záporná a je zadán příkazem *digitalWrite(DIR, hodnota)* s hodnotou *LOW* pro *rozdil > 1* nebo *HIGH* pro *rozdil < -1*.

K určení počtu kroků, které má motor vykonat, je použit PS regulátor (číslicový PI regulátor). Ten se osvědčil jako nejefektivnější způsob naladění struny oproti PD a PSD regulátorům, které příliš často způsobovaly přetočení kolíku a tím opětovné rozladění struny (jen opačným směrem). Při použití P regulátoru bylo vykonáváno více ladících cyklů, tudíž ladění trvalo déle.

PS regulátor má proporcionální a sumační složku, jak je vidět v rovnici (7), kde $u(kT)$ je akční veličina v diskrétním čase, $e(kT)$ regulační odchylka v diskrétním čase, K_p je konstanta zesílení proporcionálního regulátoru, K_i je zesílení sumační části regulátoru, k je číslo iterace, T je perioda vzorkování regulované veličiny. Tato perioda nijak nesouvisí s A/D převodem analogového zvukového signálu na digitální, neboť regulovanou veličinou je až jeho výsledná (vypočítaná) frekvence. Proporcionální složka regulátoru určí velikost akční veličiny pomocí konstanty zesílení úměrně okamžité regulační odchylce. Sumační složka zaznamenává celkovou regulační odchylku od začátku regulace, která je vynásobena konstantou zesílení. Tím se zvyšuje hodnota akční veličiny. [37, 38]

$$u(kT) = K_p e(kT) + K_i T \sum_{i=0}^k e(iT) \quad (7)$$

Akční veličinou je v případě ladění krokovým motorem v závislosti na frekvenci počet kroků, které má motor pro naladění vykonat. Regulační odchylkou je rozdíl mezi požadovanou frekvencí a aktuální frekvencí struny, tedy absolutní hodnota proměnné *rozdil*. Pro výpočet nutných kroků byla naprogramována funkce *regulator()*, jejíž kód je následující:

```
void regulator() {
    suma=suma+(error);
    output=(Kp*error)+(Ki*T*suma);
}
```

Za *error* je dosazena hodnota proměnné *rozdil* v absolutní hodnotě a hodnota *output* je pak dosazena do proměnné *kroky* (akční veličina). Původní hodnota proměnné *suma* je 0. Hodnotu *T* bylo nutné pro tuto regulační soustavu zvolit, neboť regulovaná veličina (frekvence struny) není vzorkována přímo, a tudíž nemá danou vzorkovací periodu. Byla zvolena hodnota 0,008. Experimentálně byly zjištěny vhodné konstanty $K_p = 6$ a $K_i = 12$. Při těchto konstantách a dané hodnotě *T* je ladění nejefektivnější, tzn. na co nejmenší počet drknutí a s minimem přetočení kolíku přes hranici naladění.

Po výpočtu provede motor příslušný počet kroků. V programu je tento výpočet realizován pomocí cyklu `for` s počtem opakování odpovídajícím počtu kroků, ve kterém je na pin *STEP* přiváděno střídavě 5 V a 0 V a tím jsou generovány pulsy pro krokový motor. To je vidět v následujícím kódu. Funkce *delay()* pozastaví běh programu na 1 milisekundu, což je nutné k tomu, aby motor zaznamenal puls. Bez funkce *delay()* se motor netočí.

```
for (m = 0; m < abs(kroky); m++) {
    digitalWrite(STEP, HIGH);
    delay(1);
    digitalWrite(STEP, LOW);
    delay(1);
}
```

Pootočením motoru je pootočeno ladícím kolíkem. Změní se tedy naladění struny. Po pootočení se v případě, že struna dosud není naladěna, začne znovu detekovat frekvence ještě doznívajícího tónu z předchozího drknutí, nebo uživatel drkne na strunu znovu. Celý cyklus od načtení nových hodnot frekvence po otočení kolíkem se opakuje, dokud nedojde k úplnému naladění.

Při nasazování redukce na ladící kolík docházelo k vibračním nástrojům na vysokých frekvencích, což mělo za následek vysoké hodnoty proměnné *rozdil*, která neodpovídala naladění struny, a tím vysoký počet kroků motoru, což působilo jeho nesmyslné otáčení. Tato chyba byla eliminována vložением podmínky spuštění ladění jen při hodnotě proměnné *rozdil* činící maximálně 150.

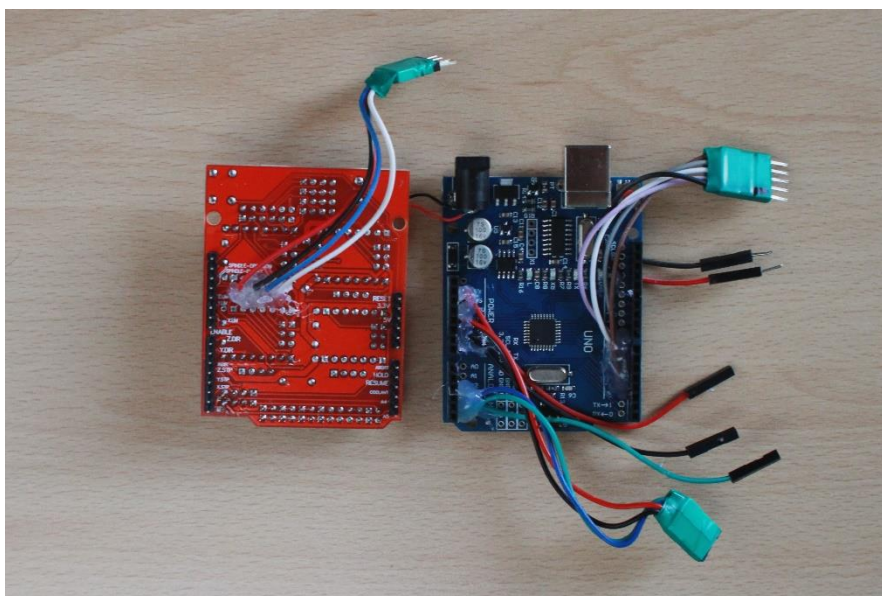
4.7 Výsledná podoba ladičky

Během programování Arduina a testování funkčnosti ladičky byly všechny komponenty (obvod, klávesnice, displej, řadič, krokový motor) připojeny k pinům Arduina přes odpovídající piny CNC shiledu pouze propojovacími kabely bez připájení. Po ověření správné funkčnosti ladičky bylo nutné komponenty uzavřít do krabičky určené pro elektronická zařízení. Základním požadavkem byly nejmenší možné rozměry.

Byla zvolena dvoudílná černá krabička o rozměrech 168x84x35 mm z polystyrenu. Do ní byly vyřezány otvory pro displej, dvoupólový vypínač a otvory pro protažení kabelů ke klávesnici a motoru, který je jako jediný komponent umístěn mimo krabičku. Byl také vyvrtán otvor pro zásuvku 6,3 mm mono jack. Poloha otvorů byla zvolena s ohledem na ostatní komponenty, které mají být do krabičky umístěny.

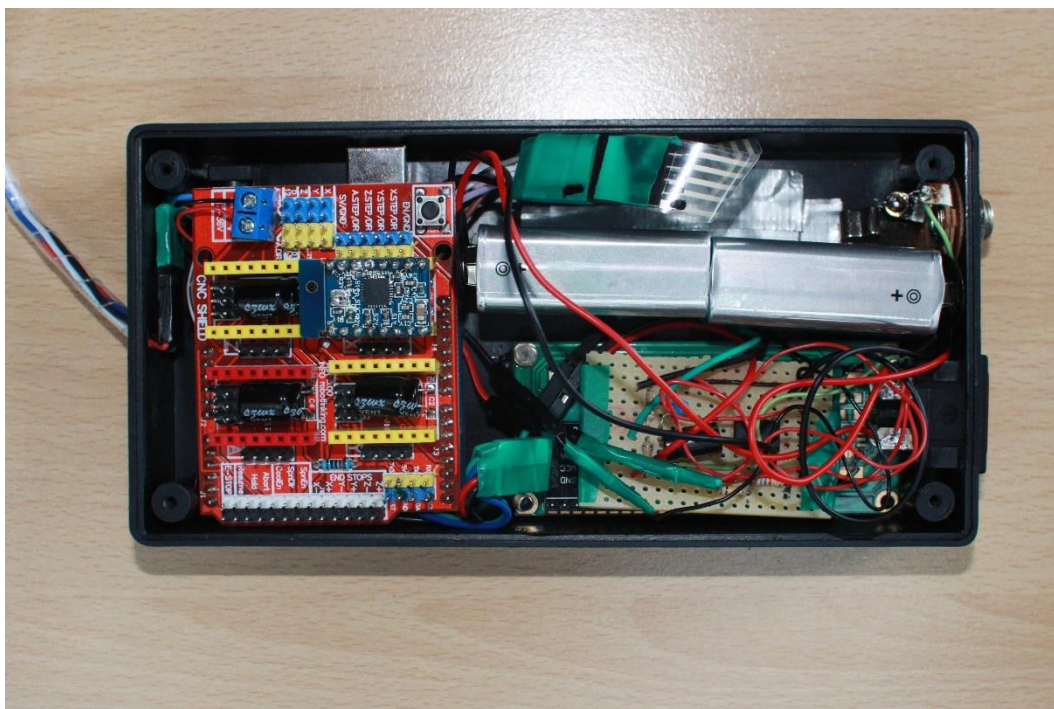
Do příslušného otvoru byl osazen LCD displej, který je na místě zajištěn tavným lepidlem. Byl osazen také 6,3 mm jack, zajištěný matkou a vypínač. K jacku a vypínači byly připájeny příslušné drátky elektrického obvodu pro úpravu vstupního signálu. Obvod byl do krabičky vložen na univerzální desce plošného spoje. Z obvodu jsou vyvedeny dva konektory pro devítivoltové baterie a pět drátků s konektory pro propojení Arduina a obvodu (pro napájení Arduina a motoru a pro přenos analogového signálu). Na čelní stranu krabičky byla přilepena membránová klávesnice a její kabely byly zavedeny do krabičky. Číslo 1 na klávesnici odpovídá první struně na nástroji, tedy struně G, č. 2 druhé struně (struně C), č.3 třetí struně (E) a č.4 struně čtvrté (A).

Dalším krokem bylo vyvedení potřebných pinů Arduina a CNC shieldu s připojeným řadičem motoru. Připojení kabelů bez pájení na vrchní straně CNC shieldu nebylo možné kvůli rozměrům krabičky. Z toho důvodu byly kabely s konektory pro displej, klávesnici a připojení obvodu připájeny k příslušným pinům na vrchní straně Arduina. Na spodní straně Arduina pak byly připájeny drátky pro jeho napájení. K napájecímu konektoru na jeho vrchní straně byly připájeny drátky pro napájení CNC shieldu. Ty byly připojeny ke napájecím svorkám na vrchní straně CNC shieldu. Na spodní straně CNC shieldu byly připájeny 4 drátky s konektory pro připojení krokového motoru. Pájené spoje byly proti vytrhnutí zajištěny tavným lepidlem. Vyvedení pinů je vidět na obr. 27.



Obr. 27: Připájené kabely s konektory na Arduino a CNC shield

Do krabičky bylo vloženo Arduino s připojeným CNC shieldem, byli do ní zavedeny kabely krokového motoru, které byly připojeny příslušnými konektory k CNC shieldu. Arduino bylo propojeno s I²C převodníkem displeje, klávesnicí a elektronickým obvodem příslušnými konektory. Do krabičky byly vloženy také dvě devítivoltové baterie, připojené ke konektorům k tomu určeným. Kompletní osazení krabičky je na obr. 28. Na obr. 29 je finální podoba elektronické ladičky s krokovým motorem.

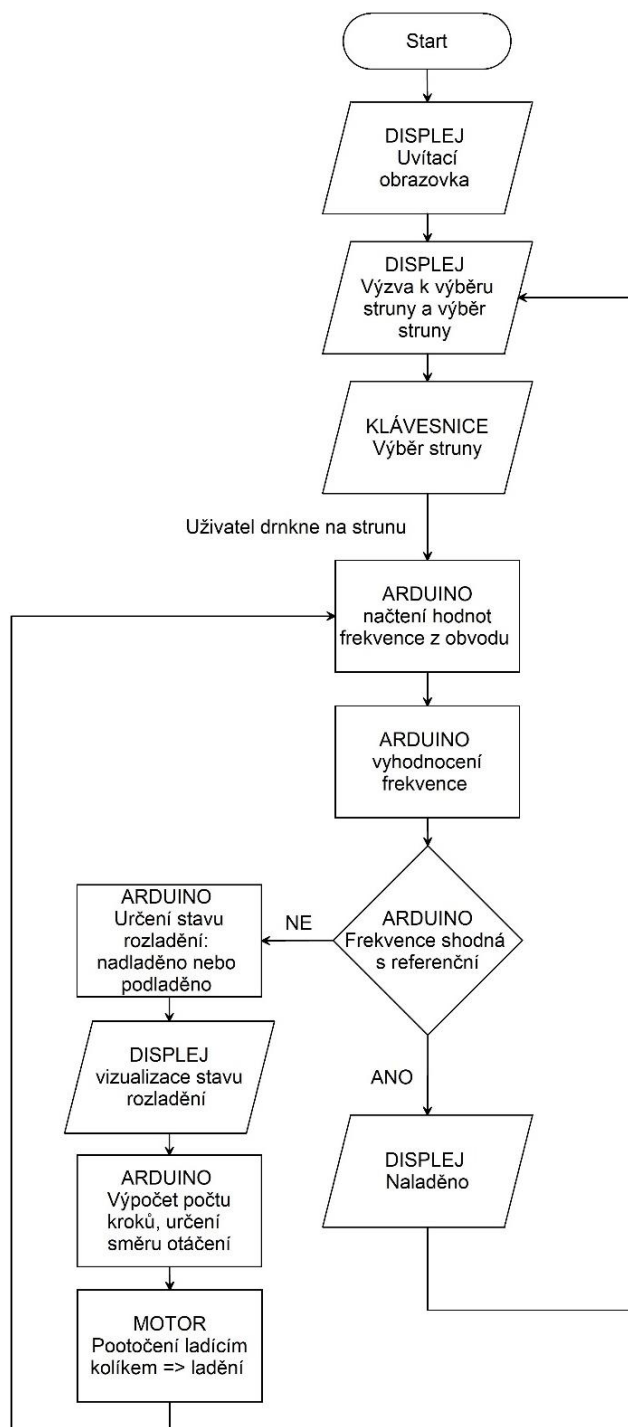


Obr. 28: Uspořádání komponentů ladičky v krabičce



Obr. 29: Výsledná podoba elektronické ladičky

Důležité části řídicího programu ladičky byly rozebrány v předcházejících kapitolách. Na vývojovém diagramu níže (obr. 30) je shrnut základní algoritmus práce ladičky. Program je spuštěn přepnutím vypínače na těle ladičky do polohy I (zapnutí napájení) a ukončen jeho přepnutím do polohy 0 (vypnutím napájení). Celkový zdrojový kód řídicího programu je na přiloženém CD.



Obr. 30: Základní algoritmus fungování ladičky

Funkčnost ladičky byla ověřena na tenorovém elektroakustickém ukulele pomocí klipové ladičky. Videoukázka ladění je na CD v příloze 1.

5 ZÁVĚR

Cílem této práce bylo navrhnout a realizovat automatickou ladičku použitelnou pro všechna obvykle laděná ukulele (G₄-C₄-E₄-A₄) na základě platformy Arduino, napájenou bateriemi. Výběr laděné struny měl být proveden uživatelem. Ladička měla zobrazovat stav naladění a s využitím krokového motoru otáčet ladícím kolíkem tak, aby byla struna naladěna.

Prvním krokem před řešením dané problematiky byla rešerše již existujících elektronických a automatických ladiček. Byla shrnuta různá provedení ladiček a různé způsoby nastavování tenze struny a posouzeny jejich výhody a nevýhody.

V druhé části práce byl proveden návrh ladičky. Byly zhodnoceny jednotlivé způsoby snímání zvuku, vhodné pro snímání zvuku z ukulele. Důležitými body byl návrh elektronického obvodu pro úpravu analogového zvukového signálu ze snímače pro potřeby analogového vstupu Arduina, seznámení s platformou Arduino a výběr vhodného typu Arduina (UNO R3). Byl navrhnout způsob zobrazování informací o naladění pomocí LCD displeje. Na závěr této části práce byl popsán princip krokového motoru, způsob jeho zapojení pomocí CNC shieldu k Arduinu a jeho ovládání řadičem pro krokové motory. Pro přenos kroutícího momentu z hřídele krokového motoru na ladící kolík byla v softwaru Autodesk Inventor 2017 navržnuta redukce, které bude možné vytisknout na 3D tiskárně.

Třetí část práce byla zaměřena na realizaci elektronické ladičky podle zmíněného návrhu. Obsahovala postup vytváření elektronického obvodu pro úpravu zvukového signálu, zapojení jednotlivých komponent a popis důležitých částí řídicího programu Arduina. Parametry A/D převodníku Arduina musely být nastaveny pro dosažení vhodné vzorkovací frekvence. Na základě převedeného signálu pak řídicí program vyhodnocoval frekvenci zvukového signálu, porovnával, zda je daná struna naladěna a v závislosti na tom zajišťoval ovládání displeje (vizualizaci naladění) a krokového motoru (ladění). Jedna z podkapitol byla věnována výrobě redukce pro spojení hřídele motoru s ladícím kolíkem za pomoci 3D tisku. Závěrem třetí části byla shrnuta kompletace a výsledná podoba ladičky spolu se základním algoritmem jejího fungování.

Sestrojená automatická ladička splňuje všechny požadované parametry. Je napájena dvěma devítivoltovými bateriemi. Výběr laděné struny uživatel provádí pomocí membránové klávesnice se čtyřmi tlačítky (každé pro jednu strunu ukulele). Stav naladění a základní informace o ladění jsou vizualizovány na LCD displeji. Otáčení ladícím kolíkem zajišťuje krokový motor. Vše je ovládáno pomocí Arduina UNO R3. Univerzálnost ladičky je zajištěna přítomností zásuvky 6,3 mm mono jacku, která umožňuje připojení nejrozličnějších typů snímačů od dynamických, přes klipové mikrofony až po interní snímače nástrojů. Snímač však musí dosahovat dostatečné kvality, aby nezkrasoval zvukový signál vydaný nástrojem. Ladění ukulele krokovým motorem je poměrně efektivní. Daná struna je ve většině případů naladěna na jedno až tři drnknutí, což je v porovnání s ručním laděním podle vizualizace klipové ladičky dobrý výsledek. Ladička neladí struny na úplně přesnou frekvenci, což je dáno mj. zdiskretizováním

analogového zvukového signálu. Zvládá je však naladit na frekvenci s odchylkou od referenční frekvence struny 2,5 Hz. To v daném intervalu frekvencí tónů ukulele odpovídá cca osmnáctině tónu. Tudíž je to i pro člověka s absolutním hudebním sluchem pravděpodobně nerozlišitelná hodnota. K ověření funkčnosti ladičky bylo použito elektroakustické tenorové ukulele. Zvuk byl snímán interním piezo snímačem nástroje. Správnost naladění byla ověřena za pomoci klipové ladičky.

Videoukázka ladění pomocí ladičky je na CD v příloze 1. Nejprve je drknuto na dobře naladěné ukulele. Poté jsou rozladěny struny 1 a 2 (G a C), které jsou vzápětí naladěny pomocí sestrojené automatické ladičky.

Ladička lze dále vylepšit např. přidáním step-up měniče, díky kterému by bylo možné použít jen jednu devítivoltovou baterii místo dvou, což by mohlo vést i ke zmenšení rozměrů ladičky.

6 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] How an Electric Guitar Actually Works. Mashable [online]. Copyright ©2005 [cit. 04.04.2017]. Dostupné z: <http://mashable.com/2012/12/13/electric-guitar/#8u80LHIQFaqy>
- [2] Five Things You Might Not Know About Jimmy Page's Guitars. Ultimate Classic Rock [online]. Dostupné z: <http://ultimateclassicrock.com/jimmy-page-guitars/>
- [3] The Transperformance self-tuning guitar. New Atlas - Latest News [online]. Copyright © Gizmag Pty Ltd 2017 [cit. 07.04.2017]. Dostupné z: <http://newatlas.com/go/4951/>
- [4] TransPerformance self-tuning guitar (Guitarsite). GuitarSite.com: Guitars, Lessons, Reviews and Guitar News (Guitarsite) [online]. Copyright © 1999 [cit. 07.04.2017]. Dostupné z: <http://www.guitarsite.com/database/Guitars/rec/4342/>
- [5] Gibson Guitar: Limited Edition Robot Guitars, SG Series Guitar With Automatic Electric Guitar Tuner. Gibson Guitar: Electric Guitar, Acoustic Guitar, Slash Guitars, How To Play Guitar Lessons, Baldwin Pianos, Amps, Strings, Stories and Music News [online]. Dostupné z: <http://archive.gibson.com/RobotGuitar/guitar.html>
- [6] Gibson Guitar: Min-ETune™. Gibson [online]. Copyright © 2013 Gibson Guitar Corp. All rights reserved. [cit. 10.04.2017]. Dostupné z: <http://www.gibson.com/Products/Min-ETune.aspx>
- [7] Installing the Tronical Tune by Cooper Carter - YouTube. YouTube [online]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=W0H-ZmtE4AU>
- [8] Tronical - Thomann Česko. Herzlich Willkommen [online]. Copyright © 1996 [cit. 10.04.2017]. Dostupné z: <https://www.thomann.de/cz/tronical.html>
- [9] Roadie Automatic Guitar Tuner. Roadie Automatic Guitar Tuner [online]. Copyright © 2017 [cit. 01.05.2017]. Dostupné z: <https://www.roadietuner.com/>
- [10] Instructables - How to make anything [online]. Copyright © 2016 Autodesk, Inc. [cit. 01.05.2017]. Dostupné z: <http://www.instructables.com/id/Automatic-Guitar-Tuner/>
- [11] Automatic guitar tuner - YouTube. YouTube [online]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=qFm7QDSQOHQ>
- [12] Instructables - How to make anything [online]. Copyright © 2016 Autodesk, Inc. [cit. 14.04.2017]. Dostupné z: <http://www.instructables.com/id/Arduino-Audio-Input/>
- [13] Piezoelektrický jev :: MEF. Fyzika :: MEF [online]. Copyright © 2006 [cit. 11.04.2017]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/418-piezoelektricky-jev>
- [14] Elektrodynamický mikrofon :: MEF. Fyzika :: MEF [online]. Copyright © 2006 [cit. 12.04.2017]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/385-elektrodynamicky-mikrofon>
- [15] How a Dynamic Microphone Works - YouTube. YouTube [online]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=qcmY9UFLqg4>
- [16] How An Electric Guitar Works - YouTube. YouTube [online]. Dostupné z: https://www.youtube.com/watch?v=IBAZepM5F_0
- [17] VODA, Zbyšek. Průvodce světem Arduina. Bučovice: Martin Stríž, 2015. ISBN 978-80-87106-90-7.
- [18] Arduino - Introduction . Arduino - Home [online]. Dostupné z: <https://www.arduino.cc/en/Guide/Introduction>
- [19] Arduino - ArduinoBoardUno . Arduino - Home [online]. Dostupné z: <https://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardUno>

- [20] Praktická elektronika/Operační zesilovače – Wikiknihy. [online]. Dostupné z: https://cs.wikibooks.org/wiki/Praktick%C3%A1_elektronika/Opera%C4%8Dn%C3%AD_zesilova%C4%8De
- [21] Operační zesilovač – E-automatizace. [online]. Dostupné z: http://www.e-automatizace.cz/ebooks/ridici_systemy_akcni_cleny/O_zesilovac.html
- [22] Instructables - How to make anything [online]. Copyright © 2016 Autodesk, Inc. [cit. 14.04.2017]. Dostupné z: <http://www.instructables.com/id/Arduino-Guitar-Tuner/>
- [23] Dělič napětí :: MEF. Fyzika :: MEF [online]. Copyright © 2006 [cit. 14.04.2017]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/1662-delic-napeti>
- [24] Arduino-Home [online]. Dostupné z: <http://arduino-home.webnode.cz/news/dil-12-lcd-displej-1602-a-2004-na-i2c-sbernici/>
- [25] Stepper Motor - How It Works - HowToMechatronics. How To Mechatronics [online]. Copyright © 2017 HowToMechatronics.com. All rights reserved. [cit. 08.05.2017]. Dostupné z: <http://howtomechatronics.com/how-it-works/electrical-engineering/stepper-motor/>
- [26] Krokový motor. Domů - PohonnaTechnika.cz [online]. Copyright © Pohonnatechnika.cz 2007 [cit. 08.05.2017]. Dostupné z: <http://www.pohonnatechnika.cz/skola/motory/krokovy-motor>
- [27] Stepper motor driver - RepRapWiki. RepRap - RepRapWiki [online]. Dostupné z: http://reprap.org/wiki/Stepper_motor_driver
- [28] Pololu - A4988 Stepper Motor Driver Carrier. Pololu Robotics and Electronics [online]. Copyright © 2001 [cit. 08.05.2017]. Dostupné z: <https://www.pololu.com/product/1182/specs>
- [29] Arduino - AnalogRead . Arduino - Home [online]. Dostupné z: <https://www.arduino.cc/en/Reference/analogRead>
- [30] Vzorkování signálu :: MEF. Fyzika :: MEF [online]. Copyright © 2006 [cit. 09.05.2017]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/1356-vzorkovani-signalu>
- [31] Gammon Forum : Electronics : Microprocessors : ADC conversion on the Arduino (analogRead). Gammon Software Solutions Home Page [online]. Dostupné z: <http://www.gammon.com.au/adc>
- [32] Robot Platform | Knowledge | ADC Registers 2. Robot Platform [online]. Copyright © Copyright 2010 [cit. 10.05.2017]. Dostupné z: http://www.robotplatform.com/knowledge/ADC/adc_tutorial_3.html
- [33] Robot Platform | Knowledge | ADC Registers 1. Robot Platform [online]. Copyright © Copyright 2010 [cit. 10.05.2017]. Dostupné z: http://www.robotplatform.com/knowledge/ADC/adc_tutorial_2.html
- [34] Instructables - How to make anything [online]. Copyright © 2016 Autodesk, Inc. [cit. 23.05.2017]. Dostupné z: <http://www.instructables.com/id/Arduino-Frequency-Detection/>
- [35] How to Tune the Ukulele - Get-Tuned.com. Get-Tuned.com [online]. Copyright © 2017 Get [cit. 23.05.2017]. Dostupné z: <http://www.get-tuned.com/how-to-tune-the-ukulele.php>
- [36] 15. díl - Arduino a I2C sběrnice. itnetwork.cz - Ažťácká sociální síť a materiálová základna pro C#, Java, PHP, HTML, CSS, JavaScript a další. [online]. Copyright © 2017 itnetwork.cz. Veškerý obsah webu [cit. 22.05.2017]. Dostupné z: <https://www.itnetwork.cz/hardware-pc/arduino/arduino-a-i2c-sbornice>
- [37] Atmel Corporation - Microcontrollers, 32-bit, and touch solutions [online]. Copyright ©1 [cit. 24.05.2017]. Dostupné z: http://www.atmel.com/Images/Atmel-2558-Discrete-PID-Controller-on-tinyAVR-and-megaAVR_ApplicationNote_AVR221.pdf
- [38] 4. Konvenční typy lineárních diskretních regulátorů a jejich modifikace. Číslicová regulace - katedra 352, VŠB - Technická univerzita Ostrava [online]. [cit. 2017-05-24]. Dostupné z: <books.fs.vsb.cz/cislicovaregulace/data/kapitola4.html>

7 SEZNAM OBRÁZKŮ, TABULEK A ZKRATEK

7.1 Seznam obrázků

Obr. 1: Sopranové akustické ukulele a tenorové elektroakustické ukulele se základním popisem.....	15
Obr. 2: Klasická ladička, převzato z: https://kytary.cz Klipová ladička a klipová ladička bez zadního krytu s piezoměničem.....	17
Obr. 3: Klipová ladička a klipová ladička bez zadního krytu s piezoměničem.....	17
Obr. 4: Ladící mechanika a počítač TransPerformance, převzato z [3]	18
Obr. 5: Tělo kytary se systémem TransPerformance, převzato z [3]	18
Obr. 6: Ladící systém Tronical Tune, převzato z [8].....	19
Obr. 7: Roadie Tuner, převzato z [9]	19
Obr. 8: Schéma dynamického mikrofonu	21
Obr. 9: Klon Arduino UNO, převzato z: http://www.robotistan.com	23
Obr. 10: Posunutí střední hodnoty signálu.....	24
Obr. 11: Zesílení signálu.....	24
Obr. 12: Schéma zapojení neinvertujícího zesilovače	24
Obr. 13: Schéma zapojení obvodu upravujícího signál pro vstup do Arduina	25
Obr. 14: Princip fungování krokového motoru, převzato z [25]	26
Obr. 15: Průběh napájení jednotlivých cívek při mikrokrokování	27
Obr. 16: Reluktanční motor, převzato z [25]	28
Obr. 17: Hybridní motor, pohled zepředu převzato z [25]	28
Obr. 18: Hybridní motor, pohled shora, převzato z [25]	28
Obr. 19: CNC shield připojený k Arduino UNO se třemi připojenými řadiči A4988, převzato z: http://blog.protoneer.co.nz/arduino-cnc-shield/	29
Obr. 20: 3D návrh redukce ke spojení krokového motoru a ladícího kolíku.....	29
Obr. 21: Obvod na nepájivém poli připojený k Arduinu	30
Obr. 22: Výsledný obvod napájený na univerzální desce.....	31
Obr. 23: Hodnoty pro výpočet směrnice přímky	34
Obr. 24: Membránová klávesnice, převzato z http://robotstore.cz	36
Obr. 25: Návrh obrazovky stavu naladění	37
Obr. 26: Krokový motor s redukcí vytištěnou na 3D tiskárně.....	38
Obr. 27: Připájené kabely s konektory na Arduino a CNC shield.....	41
Obr. 28: Uspořádání komponentů ladičky v krabici	42
Obr. 29: Výsledná podoba elektronické ladičky.....	42
Obr. 30: Základní algoritmus fungování ladičky.....	43

7.2 Seznam tabulek

Tab. 1:	Porovnání zarovnání doprava a doleva	32
Tab. 2:	Referenční frekvence strun, hodnoty dle [35].....	35

7.3 Seznam zkratk

ABS	Akrylonitrilbutadienstyren – plastový materiál pro 3D tisk
A/D	Analogově digitální (převod, převodník)
I²C	Inter-Integrated Circuit – sériová sběrnice
LCD	Liquid crystal display – typ displeje
LED	Light-Emitting Diode – světlo vyzařující dioda
PLA	Polylactic acid – plastový materiál pro 3D tisk
SCL	Synchronous clock – vodič pro hodinový signál u I ² C
SDA	Synchronous data – datový kanál u I ² C
XLR	Audio konektor pro profesionální využití

8 SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1 – CD:

Přiložené CD obsahuje:

- elektronickou verzi této bakalářské práce v PDF
- zdrojový kód řídicího programu ve formátu .ino (Arduino file) a .txt
- videoukázka ladění pomocí elektronické ladičky